



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Eficiencia de captación de rejas y sumideros mediante coeficientes de desagüe como orificio

Treball realitzat per:

Xavier Vidal Navarro

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 12 de Juny del 2019

Departament DECA

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Agradecer a mi tutor, Manuel Gómez, la comprensión de mi situación, toda la paciencia que ha tenido y todo el tiempo invertido para ayudarme a tirar para adelante este trabajo.

También a mi mujer, que me ha apoyado en todo momento, que después de un año muy difícil hemos podido superar todas las adversidades y alcanzar todos los objetivos que queríamos alcanzar.

A mi sobrino que debido a este año tan difícil donde ha pasado de sobrino a casi ser un hijo y que siempre ha tenido una sonrisa para mí.

A mi madre que me ha animado a visualizar un resultado positivo en todo momento.

Finalmente, a Femarec, especialmente a mis compañeros Sergi, Jose Luis y Laura que me ha facilitado poder asistir a ciertas clases y reuniones con profesores y también a todos los usuarios que me han apoyado y dado fuerzas para alcanzar todos los objetivos marcados.

Resumen

Título: Eficiencia de captación de rejas y sumideros mediante coeficientes de desagüe como orificio

Autor: Xavier Vidal Navarro

Tutor: Manuel Gómez

A raíz de unas fuertes inundaciones en Barcelona el año 1997 el Instituto Flumen de la Universitat Politècnica de Catalunya empieza a plantearse estudiar la capacidad de captación que tienen los diversos sumideros de la ciudad para así poder dimensionar de forma adecuada las redes de desagüe y evitar posteriores inundaciones con calados muy elevados en las calles para evitar pérdidas económicas, pérdida de funcionalidad de nuestras calles y eliminar el peligro para los ciudadanos.

El Instituto Flumen de la UPC estudió la eficiencia de captación de diferentes rejas con una plataforma que simulaba la misma situación que en una calle real y que permitía conseguir diferentes pendientes, tanto transversales como longitudinales. Tras estos ensayos se desarrolló una ley potencial que definía la eficiencia de cada reja a partir de dos parámetros A y B y del factor Q/y , ratio entre el caudal de aproximación y el calado aguas arriba de la reja.

Este estudio fue muy válido y con resultados muy interesantes donde se podía ver en términos absolutos que unas rejas captaban más caudal que otras, pero ¿lo hacían porque tenían mayor área de huecos o porque el rendimiento de la reja era mejor?

A la respuesta a esta pregunta aparece el concepto de coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio dónde se tiene en cuenta el área de los huecos de cada reja, el caudal captado por ésta y la energía del flujo de aproximación aguas arriba.

En este trabajo expresamos a partir de la ley potencial de eficiencia de captación de sumideros definida por los dos parámetros A y B, los diferentes coeficientes de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio según la geometría de la calle. Relacionaremos estos valores de coeficientes de desagüe con el caudal aguas arriba de la reja, el caudal captado, la ratio entre el caudal de aproximación y el calado aguas arriba de la reja Q/y y el número de Froude.

Para llevar a cabo el cálculo de los coeficientes de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio hemos usado la herramienta Excel para obtener el coeficiente para cada sumidero. Hemos usado también la expresión de Manning para representar el caudal aguas arriba de la reja en función del calado según cada geometría de la calle y la ley potencial de eficiencia de captación que nos ha permitido, sabiendo los parámetros A y B de cada sumidero, calcular la eficiencia de cada uno de ellos según el caudal aguas arriba de la reja y así saber el caudal captado en cada situación.

Abstract:

Title: Water intake efficiency of grates and inlets by means of water flow rate through orifice coefficients.

Author: Xavier Vidal Navarro

Tutor: Manuel Gómez

In the aftermath of the 1997 heavy flooding in Barcelona, the Flumen Institute of the *Universitat Politècnica de Catalunya* started to consider studying the capacity of the city's drains and inlets to properly scale the drainage network to avoid further floods with large depths of water on the streets and financial losses, as well as the loss of street functionality and to erase any danger for the citizens.

The UPC Flumen Institute studied the intake efficiency of the different grate bars using a platform to simulate the streets conditions and to achieve different inclinations, both lengthways and crossways. After these trials, they developed a potential law that established each grate efficiency using criteria A and B and the Q/y factor, the ratio between the approaching flow and the draught of the water above the grate.

This study was highly validated and the very interesting results showed, in absolute terms, that the different grates were able to intake different flows. But was it thanks to having a wider hole area or because the grate had a better performance?

In searching of the answer, the term draining or runoff coefficient appeared, and it assumes a water flow rate through orifice that takes into consideration the water that is driven out by the grate openings, the flow that the drain is able to intake and the energy of the water above the grate.

In this paper the different drainage coefficients that assume a water flow rate through orifice according to the geometry of the street, are expressed by the potential law of intake efficiency of the drains. These drainage values will be related with the flow of the water above the grate, the flow intaken, the ratio between the approaching flow and the draught of the water above the grate Q/y , and the Froude number.

In order to carry out the calculation of the drainage coefficients of a water flow rate through orifice we used the Excel tool to obtain the rate for each drain. We used the Manning formula to calculate the flow of the water above the grate according to the street geometry and the intake potential efficiency law, that allowed us, knowing the A and B parameters of each drain, to estimate the efficiency of each inlet according to the flow of the water above the grate and to ultimately know the flow intake in each case.

Índice

1. Introducción y objetivos.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Objetivos	9
2. Conceptos iniciales.....	10
2.1 Sistema captación	10
2.2 Mecanismo de captación.....	11
2.3 Eficiencia de captación	11
3. Criterios de peligrosidad	12
4. Ensayos realizados.....	14
5. Ley potencial de eficiencia de captación.....	17
6. Coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio	19
7. Proceso de cálculo	21
8. Análisis de los resultados	24
8.1 Coeficiente de desagüe con geometrías de calle fijas.....	24
8.1.1 Coeficiente de desagüe en función del caudal de la calle con geometrías de calle fijas	24
8.1.2 Coeficiente de desagüe en función del caudal captado con geometrías de calle fijas	31
8.1.3 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle fijas	32
8.2 Coeficiente de desagüe con geometrías de calle variables.....	36
8.2.1 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal	36
8.2.2 Coeficiente de desagüe en función del caudal circulante con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal	37
8.2.3 Coeficiente de desagüe en función del caudal captado con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal	41
8.2.4 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal	42
8.2.5 Coeficiente de desagüe en función del caudal circulante con geometrías de calle variables modificando la pendiente transversal	44

8.2.6 Coeficiente de desagüe en función del número de Froude con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal	45
---	----

10. Conclusiones	49
-------------------------------	-----------

1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Desde el inicio de la historia las fuertes lluvias han provocado inundaciones que han afectado a los seres que habitaban esas zonas y que incluso modificaban la geología de los terrenos, considerándose un fenómeno natural bastante común. Debido a la actuación del ser humano a la hora de urbanizar terrenos se ha agravado este fenómeno, ya que al urbanizar aumentamos la impermeabilidad del suelo provocando que el agua tenga mayor dificultad para ser desalojada.

Para los que nos dedicamos a diseñar zonas urbanas no se contempla o al menos deberíamos hacer todo lo que está en nuestro alcance para evitar que, por una fuerte lluvia, se tenga que interrumpir las actividades diarias en una ciudad. Situaciones de caudales y calados muy elevados implican riesgos para los ciudadanos, pero también riesgos económicos y de funcionalidad de la calle.

El objetivo entonces pasa por conseguir evacuar la mayor parte de agua posible que circula por las calles o al menos dejar en superficie una cantidad que no sea un peligro para los ciudadanos. La solución generalizada ha sido crear una red subterránea de escorrentía que fuera capaz de captar el máximo posible de agua dejando solo en superficie la que no se pudiera captar, por lo que se empezaron a diseñar los sistemas de captación.

Se empezaron a colocar sumideros para que el agua fuera captada, a diseñar calles con pendientes transversales que permitieran llevar el agua hasta estos sumideros, pero la colocación de éstos y la tipología de las rejillas parecía más cosa de azar o estética que no resultado de un estudio eficiente para la resolución de la problemática de las inundaciones.

Prueba de esta realidad es que muchos colectores tras una inundación no se habían llenado al cien por cien, se había sobredimensionado la red de drenaje inferior al considerar que todo el caudal sería interceptado. Esta situación fue causada al asumir que toda el agua sería captada por los sumideros, sin un estudio exhaustivo de la capacidad de captación de éstos. Esta realidad se agrava cuando al preguntar a los suministradores sumideros la capacidad de captación de sus productos sólo eran capaces de responder sobre las características mecánicas y la estética de éstos.

Es entonces cuando la UPC empezó a estudiar las capacidades de captación de diferentes sumideros a través de ensayos con una plataforma que imitaba con bastante exactitud las circunstancias de lluvia en una calle de cualquier ciudad.

A través de estos ensayos a escala real, entre otros interesantes resultados, se obtuvo una ley potencial de eficiencias por cada una de las rejillas ensayadas. Se descubrió que fuera cuál fuera la rejilla ensayada la eficiencia de captación de éstas disminuía de forma exponencial a medida que el cociente entre el caudal y el calado agua arriba de la rejilla aumentaba y que además lo hacía con unas correlaciones muy elevadas.

Se había conseguido a través de un ensayo a escala real expresar las eficiencias de diferentes rejillas ajustándolas a una función exponencial con unos parámetros A y B correspondientes a

cada reja y además se había conseguido deducir una serie de fórmulas que nos permitían calcular esta eficiencia fuera cual fuera la geometría de la calle.

No obstante, creemos que sería muy interesante poder expresar estos resultados a partir de un coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio, ya que creemos que es un valor que representa mejor la capacidad de captación de agua de los diferentes sumideros.

Durante este trabajo estudiaremos el valor del coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio para diferentes rejillas, cómo este se ve modificado con la geometría de la calle, el caudal aguas arriba, el caudal captado, la ratio entre el caudal y el calado aguas arriba de la reja y el número de Froude.

Para llegar a estos resultados primero haremos un recorrido minucioso a través de los diferentes conceptos y estudios que nos han permitido llegar a las conclusiones finales, y esperamos que lo encontréis interesante.

1.2 Objetivos

- Exponer los conceptos de sistema de captación, mecanismos de captación y eficiencia de captación.
- Definir los criterios de seguridad que se utilizan para dimensionar el sistema de captación de una calle.
- Definir la ley potencial de eficiencias de captación.
- Calcular el coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio para diferentes geometrías de las calles y con un conjunto de rejillas de geometrías ya conocidas.
- Relacionar los valores de coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio con el caudal de la calle, el caudal interceptado, la ratio entre Q/y y el número de Froude.

2. Conceptos iniciales

2.1 Sistema captación

Es mucho tiempo el que llevamos diseñando sistemas de colectores, esas redes enterradas que tienen como objetivo drenar el agua de nuestras ciudades, sin embargo, el concepto de sistema de captación, es decir, el que persigue captar el agua de lluvia para introducirla al sistema de colectores es mucho más reciente.

Como hemos comentado anteriormente, históricamente los sumideros se situaban en las calles sin ningún tipo de criterio y las empresas suministradoras de estos lo hacían resaltando las características estéticas y de resistencia de sus productos, olvidándose de su función más importante, que capacidad de captación de agua tenían. No es hasta una inundación en Barcelona en el año 1997 que la Universidad Politécnica de Catalunya empieza a plantearse la importancia de estudiar las capacidades de captación de agua que podrían tener los sumideros.

Entendemos sistema de captación como todos los sumideros existentes en la superficie de nuestras calles que tienen como objetivo introducir la mayor cantidad de agua posible en el sistema de drenaje inferior y poder definir esta cantidad de agua para así poder diseñar con mejor criterio el sistema de colectores y evitar sobredimensionamientos.

Para trabajar con este concepto es importante asumir que no toda el agua que recorre la superficie de nuestras calles puede ser captada y que si somos capaces de saber la cantidad de agua que podemos captar podremos dimensionar correctamente la red inferior. Pero asumiendo esta realidad nos podría preocupar llegar a caudales muy elevados que provocaran accidentes en las calles. Por suerte el crecimiento del caudal no es infinito y tiene un punto máximo que depende de la lluvia, la distancia entre sumideros y el tipo de reja que se está utilizando. De esta forma podemos limitar el caudal máximo que vamos a permitir en una calle. En la siguiente gráfica vemos cómo evoluciona el caudal en función que avanza por una calle cualquiera.

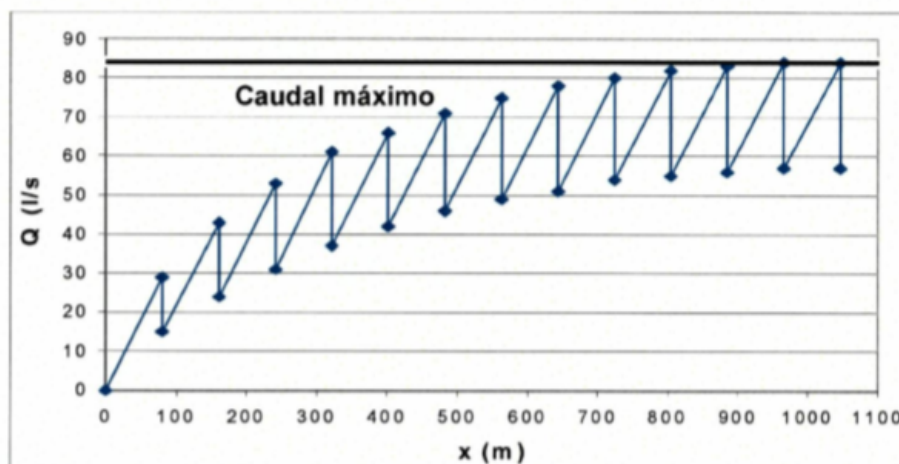


Imagen 1: Caudal máximo

2.2 Mecanismo de captación

Otro concepto importante a conocer es el mecanismo de captación que tienen los sumideros de nuestras calles. La gran mayoría de nuestras calles tienen una pendiente transversal que dirige el agua hacia los sumideros. Esta situación nos invita a definir dos formas de caudal con el que trabajaremos, el caudal frontal que recibe el sumidero, como el caudal lateral circulante, siendo ambos el caudal de la calle que será con el caudal que trabajaremos quedando definido de la siguiente manera:

$$Q_{calle} = Q_{frontal} + Q_{lateral}$$

Siendo el caudal frontal y el caudal lateral los indicados en la imagen:

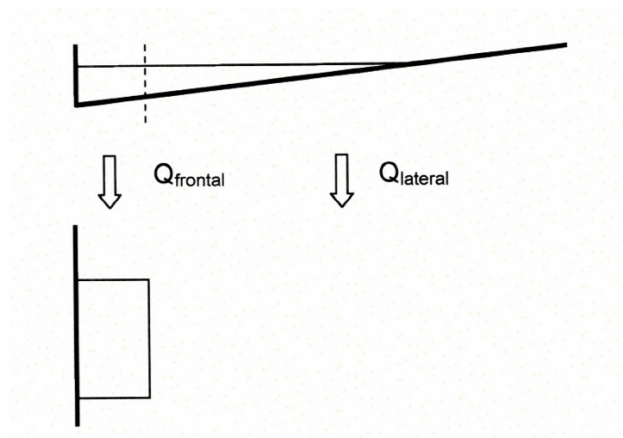


Imagen 2: Esquema circulación del caudal

2.3 Eficiencia de captación

Otro concepto muy importante para empezar este tipo de estudios fue el de eficiencia de captación ya que iba a ser muy útil para estudiar la captación de escorrentía de un sumidero. Se definió la eficiencia de captación como el cociente del caudal captado por el caudal de la calle, quedando de la siguiente manera:

$$E = \frac{Q_{captado}}{Q_{calle}}$$

Dónde cuando más cercanos a 1 sean los valores de la eficiencia de captación más agua es capaz de captar un sumidero y cuando más cercanos a 0 sean, menos agua es capaz de captar un sumidero.

3. Criterios de peligrosidad

Delante de una inundación son varios los peligros que pueden correr los peatones o conductores de coches. Las grandes cantidades de agua circulando por las calles pueden mover objetos que podrían impactar contra los peatones, arrastrar coches, mover tapas de alcantarillado dejando agujeros de difícil visibilidad o provocar el vuelco de las personas. Estos tipos de accidentes, en alguna ocasión, incluso se han cobrado alguna vida. Estas situaciones, en muchos casos, son agravadas por las conductas temerarias de muchas personas que no son capaces de ver los riesgos de salir a las calles cuando hay fuertes lluvias.



Imagen 3: Consecuencias inundación

Es importante entonces, definir qué criterios de peligrosidad se utilizarán para dimensionar el sistema de captación y evitar estos posibles accidentes. Los criterios de peligrosidad que se han definido son:

- Calado máximo.
- Velocidad máxima del flujo.

Esos criterios no estaban muy definidos y varios autores y países daban respuestas distintas. Es a partir de esta realidad que el grupo de investigación FLUMEN de la Universitat Politècnica de Catalunya hace un ensayo a escala real donde sometió a diversos individuos a situaciones que imitaban una inundación de una calle donde los parámetros de calado y velocidad estaban medidos constantemente.



Imagen 4: Consecuencias inundación

Se decidió observar las consecuencias que sufrían estos individuos y se decidió definir tres condiciones y ver en qué valores de calado y velocidad de flujo se encontraban el percentil 95-ésimo de las personas, obteniendo estos resultados:

- Condiciones de peligrosidad alta: donde el sujeto presentaba claros síntomas de inestabilidad y no podía maniobrar.
- Condiciones de peligrosidad media: donde el sujeto presentaba significativas pérdidas de estabilidad y maniobrabilidad.
- Condiciones de peligrosidad leve: donde el sujeto se cogía de forma instintiva al cable de seguridad, mostraba dificultades para entrar al agua y tenía pequeños problemas de estabilidad

Nivel de peligrosidad	Parámetros del flujo
	(calados entre 9 y 16)
Alto	$v > 1.88 \text{ m/s}$
Moderado	$1.51 < v < 1.88 \text{ m/s}$
Bajo	$v < 1.51 \text{ m/s}$

Tabla 1: Niveles de peligrosidad

Con estos resultados se decidió que los criterios fueran de calados máximos entre 6 y 9 cm y las velocidades máximas de 1.8 a 1.9 m/s.

4. Ensayos realizados

Pero una vez definido estos conceptos hacía falta calcular qué caudal es capaz de captar un sumidero y la única forma de hacerlo era a través de ensayos en laboratorio. Se construyó una plataforma metálica donde en ella se colocaba el sumidero que se iba a estudiar. Las dimensiones útiles de esta plataforma eran 3 metros de ancho y 5.50 metros de largo, intentando reproducir el ancho de un carril de circulación en un vial urbano, permitiendo así ensayos a escala 1:1. La plataforma permitía cambiar tanto su pendiente transversal como su pendiente longitudinal entre los rangos 0 al 4% y del 0 al 10% respectivamente. El caudal de agua que recibe la plataforma puede llegar hasta los 250 l/s gracias a un grupo de bombeo que conseguía mantener un caudal constante en la plataforma y así reproducir lo más posible el caudal de agua que circula en una calle.



Imagen 5: Plataforma de ensayos

La plataforma tenía una superficie total de 3.85 x 5.50 m, siendo el área útil tal como se ha comentado anteriormente, 3 x 5.50 m, donde el agua circula entre dos paredes de PVC de 30 cm de altura. El calado máximo que se usó en los ensayos fue de 15 cm, igual que la altura del bordillo de las calles de Barcelona. La plataforma estaba apoyada sobre tres puntos que permiten giros para así poder crear los diferentes tipos de pendiente.

Una vez definida la plataforma con la que se llevaron a cabo los ensayos hace falta saber que sumideros se usaron para este estudio. Se usaron 11 tipos de reja de la cuales se conocían sus características geométricas y las que no, se calcularon. Las rejillas estudiadas fueron las siguientes:

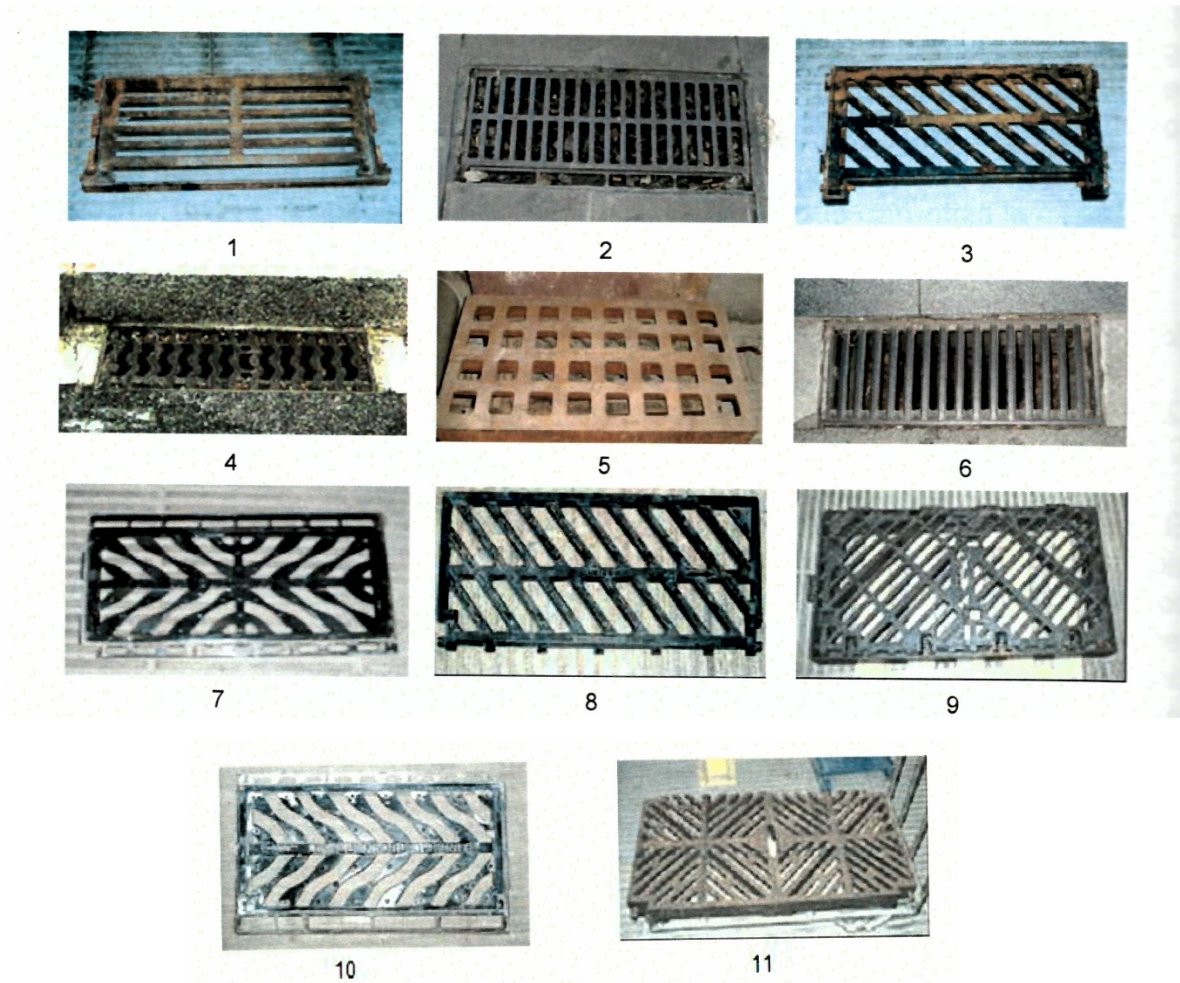


Imagen 6: Diferentes rejillas estudiadas

Como hemos comentado anteriormente, se recopilaron las características geométricas de cada tipo de reja en una tabla con estas características:

Reja	Longitud	Ancho	Área que engloba huecos	Área de huecos	Número de barras longitudinales	Número de barras transversales	Número de barras diagonales
Tipo 1	0.78	0.364	0.2114	0.1214	5	1	0
Tipo 2	0.78	0.341	0.1850	0.0873	1	17	0
Tipo 3	0.64	0.3	0.1647	0.0393	1	0	12
Tipo 4	0.776	0.345	0.225	0.1050	2	13	0
Tipo 5	0.975	0.475	0.3431	0.14	3	7	0
Tipo 6	0.8	0.3	0.1622	0.0736	0	15	0
Tipo 7	0.602	0.315	0.1807	0.0881	2	1	10
Tipo 8	0.745	0.26	0.154	0.0852	1	0	11
Tipo 9	1	0.5	0.5	0.2012	1	3	21
Tipo 10	0.602	0.315	0.1807	0.0865	2	0	8
Tipo 11	0.999	0.5	0.4940	0.176	1	3	28

Tabla 2: Características geométricas según tipo de reja

Finalmente, se empezaron a hacer los ensayos con caudales de 25, 50, 100, 150 y 200 l/s, para pendientes longitudinales de 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10% y pendientes longitudinales entre 0 y 4% para cada una de las rejillas. Se calculó después la eficiencia de cada sumidero en función de cociente entre caudal de la plataforma y calado en la plataforma y se obtuvieron resultados muy interesantes como el siguiente:

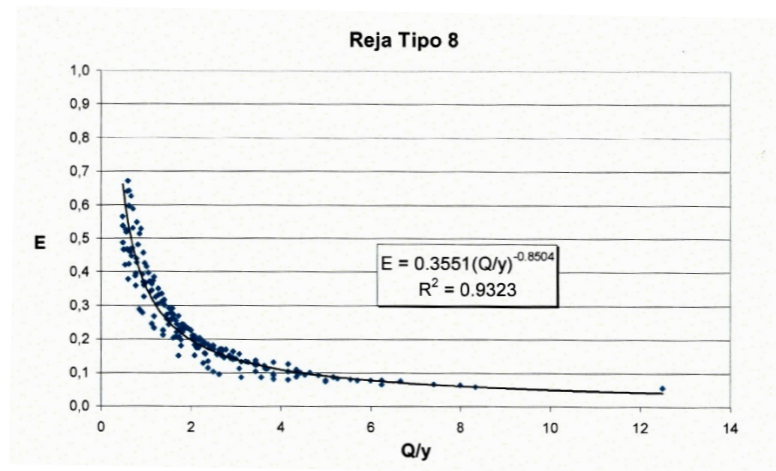


Gráfico 1: E con Q/y en reja tipo 10

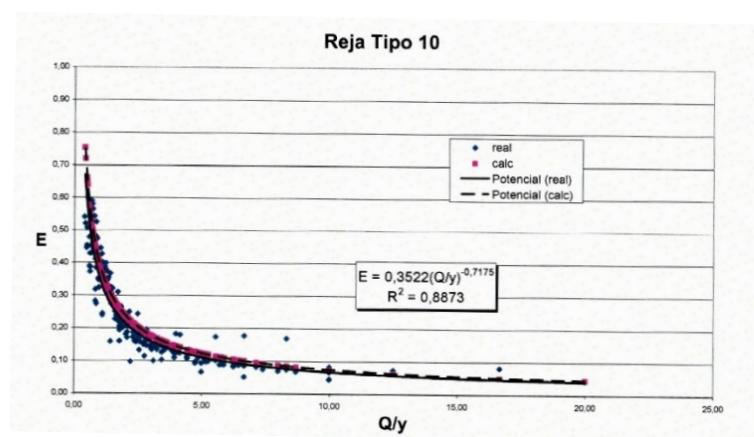


Gráfico 2: E con Q/y en reja tipo 10

5. Ley potencial de eficiencia de captación

Estos resultados aportaron varias conclusiones, pero la más importante a destacar fue un fuerte ajuste potencial entre la eficiencia de captación y la ratio Q/y que se cumplía en todas las rejillas. Se trató de un ajuste potencial del tipo:

$$E = A \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B}$$

Donde los parámetros A y B dependían del tipo de rejilla, pero fuera cual fuese el modelo de rejilla el coeficiente de correlación R^2 era elevado tal y como se ve en la siguiente tabla de recopilación de resultados:

Tipo de rejilla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	0.447	0.386	0.397	0.4301	0.536	0.3703	0.390	0.3551	0.556	0.3522	0.515
B	0.739	0.873	0.830	0.815	0.790	0.8645	0.792	0.8504	0.707	0.7175	0.688
R2	0.81	0.91	0.92	0.85	0.88	0.88	0.90	0.93	0.82	0.88	0.819

Tabla 3: Coeficiente A, B y R^2 según tipo de rejilla

Estos resultados nos permiten sacar conclusiones en geometrías donde el ancho de la calle sea de 3 metros, pero gracias a estos resultados se obtuvieron un abanico de fórmulas que nos permitirían calcular la geometría para cualquier tamaño de calzada. Los investigadores de Flumen de la UPC hicieron este recopilatorio de fórmulas:

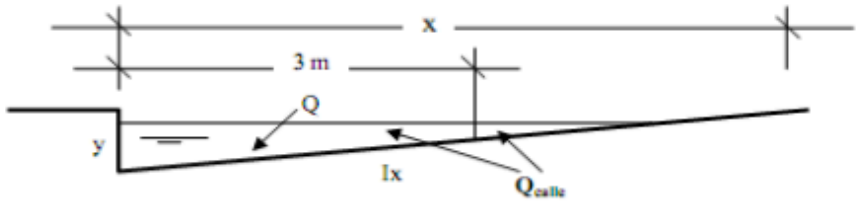
Ancho de media calzada $x = 3 \text{ m}$	
Para cada y	$E = E' = A \left(\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \right)^{-B}$
Ancho de mitad calzada $x < 3 \text{ m}$	
$y \leq x \cdot l_x$	$E = E' = A \left(\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \right)^{-B}$
$x \cdot l_x \leq y \leq 3 \cdot l_x \text{ m}$	$E' = A \cdot \left[\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \right]^{-B}$
$y \geq 3 \cdot l_x \text{ m}$	$E' = A \cdot \left[\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \right]^{-B}$
Ancho de mitad calzada $x > 3 \text{ m}$	
$y \leq 3 \cdot l_x \text{ m}$	$E = E' = A \left(\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \right)^{-B}$
$3 \cdot l_x \text{ m} \leq y \leq x \cdot l_x \text{ m}$	$E' = A \cdot \left[\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2\right) \right]^{-B}$
$y \geq x \cdot l_x \text{ m}$	$E' = A \cdot \left[\frac{Q_{\text{calle}}}{y} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \right]^{-B}$
 <p>Condición: $x > 3 \text{ m}$ $3 l_x \text{ m} \leq y \leq x l_x \text{ m}$</p>	
<p>donde:</p> <p>y es el calado (m)</p> <p>Q_{calle} es el caudal de paso por la mitad de la calle (m^3/s)</p> <p>l_x es la pendiente transversal de la calle (m/m)</p> <p>E' es la eficiencia de captación del sumidero relativa a un ancho de calle $x = 3 \text{ m}$</p> <p>$Q_{\text{int}} = E' Q$</p> <p>Q = caudal relativo a un ancho de calle $x = 3 \text{ m}$ (m^3/s)</p> <p>$E = Q_{\text{int}}/Q_{\text{calle}}$</p> <p>$Q_{\text{int}}$ = caudal efectivo interceptado por el sumidero (m^3/s)</p> <p>E = eficiencia de captación efectiva</p>	

Tabla 4: Fórmulas para cualquier geometría de sección transversal de la calle

6. Coeficiente de desagüe asumiendo un flujo de tipo orificio

El coeficiente de desagüe es el cociente entre el caudal real que pasa a través de la reja y el caudal teórico, por lo tanto, un coeficiente de desagüe elevado implica que la reja permite pasar más agua que un coeficiente de desagüe más bajo. Para calcular el coeficiente de desagüe asumiendo el flujo de tipo orificio se usa la expresión:

$$Q_{cap} = C_d * A_h * \sqrt{2 * g * H}$$

Esta expresión es muy usada para calcular el coeficiente de desagüe en depósitos dónde el orificio de salida está situado en la parte inferior o lateral de éste ya que describe muy bien la situación real de lo que está pasando.

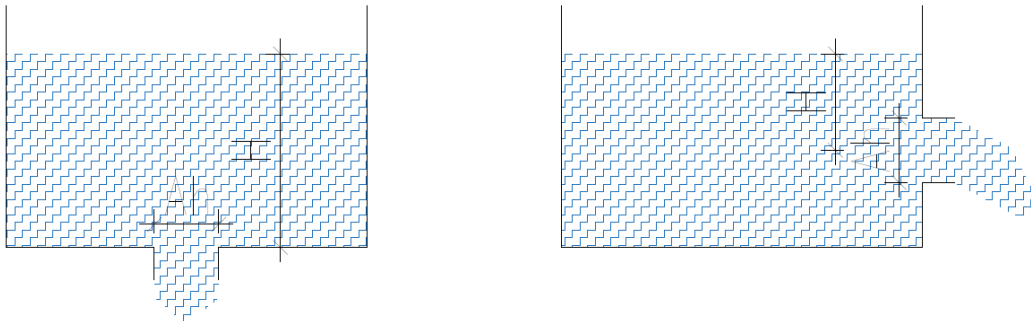


Imagen 7: Orificios en depósitos

Pero es evidente que esta situación no es la misma que nos encontramos en la calle para nuestros sumideros, dónde el agua lleva una velocidad perpendicular al orificio y que ésta tiene que hacer un giro de noventa grados para entrar en él.

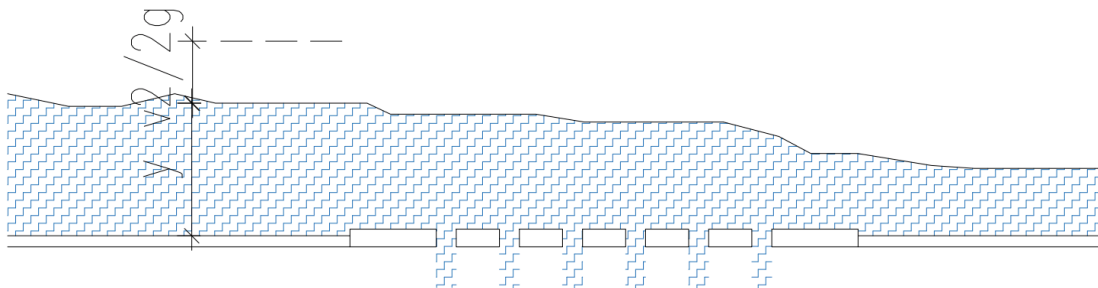


Imagen 8: Situación de desagüe en sumideros

Para nuestra situación decidimos usar la expresión donde se tiene en cuenta la energía cinética que lleva el agua, además del calado aguas arriba de la reja, quedando por tanto definida de la siguiente manera:

$$Q_{cap} = Cd * A_h * \sqrt{2 * g * E}$$

Donde, $E = y + \frac{v^2}{2g}$

El coeficiente de desagüe no es un valor constante y que se ve modificado en función del tipo de reja, el caudal y la geometría de la calle. Muchos proveedores de sumideros a nivel mundial como Neenah Foundry o softwares de modelación hidráulica como Infoworks utilizan de forma predeterminada valores de desagüe de 0.6, sobrevalorando la captación e infravalorando la posible inundación.

7. Proceso de cálculo

Para llevar a cabo nuestro objetivo y obtener para cada geometría de calle y de reja los coeficientes de desagüe del sumidero, hemos trabajado a partir de la ley potencial de captación, que a través de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio tal como hemos comentado con anterioridad, disponíamos de un ajuste potencial que nos ha permitido obtener las eficiencias de captación para cada una de las rejillas ensayadas conocidos el caudal y el calado inmediatamente antes de la reja. Partimos del ajuste potencial de la eficiencia de captación de este modo:

$$E = A \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B}$$

Donde Q es el valor del caudal circulante expresado en m^3/s , y es el calado inmediatamente antes de la reja y A y B son dos parámetros de ajuste que dependen de cada una de las rejillas estudiadas en el laboratorio. En la siguiente tabla encontramos los valores A y B de cada una de las rejillas usadas para nuestros cálculos, aunque para ciertas comprobaciones se hayan utilizado la totalidad de las 11 rejillas:

Tipo de reja	2	5	8
A	0.3860	0.536	0.3551
B	0.873	0.790	0.8504

Tabla 5: Coeficiente A y B en rejillas 2, 5 y 8

Como hemos comentado anteriormente se trata de una ecuación de ajuste potencial el cual tiene unos coeficientes de correlación muy cercano a 1. Para los tipos de reja usados para nuestros cálculos tenemos estos coeficientes de correlación:

Tipo de reja	2	5	8
R^2	0.912	0.8839	0.9323

Tabla 6: Coeficientes de correlación para el ajuste potencial en las rejillas 2, 5 y 8

Una vez hemos definido la ecuación de ajuste potencial con la que hemos trabajado, nos ha hecho falta calcular el caudal circulante según el calado inmediatamente antes de la reja. Para hacerlo hemos supuesto diferentes valores de calado 1, 2, 3, 6, 8, 12 y 15 cm y a través de la fórmula de Manning hemos calculado el caudal circulante según la geometría de la sección:

$$Q = A * \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * I^{1/2}$$

Dónde:

- A es el área de la sección de flujo del agua en metros cuadrados.
- n es el coeficiente de Manning del pavimento en la calle el cual hemos considerado 0.014
- R_h es el radio hidráulico que es el resultado de dividir la sección de flujo del agua con el perímetro mojado, se expresa en m.
- I es la pendiente longitudinal dada en tanto por uno.

Se debe tener en cuenta que para definir tanto el radio hidráulico como el área de sección de flujo se ha tenido que considerar también la pendiente transversal de la sección estudiada. En esta parte del cálculo hemos tenido que tener mucho cuidado en la creación de nuestra hoja de cálculo, ya que según el calado supuesto la geometría de la sección variaba considerablemente, cambiando así las fórmulas que nos permitían obtener el caudal circulante. A continuación, se aprecia, a modo de ejemplo, las tres geometrías distintas que se formaban con una sección con una pendiente transversal del 2% y la geometría que se formaba cuando la pendiente transversal era del 0%.

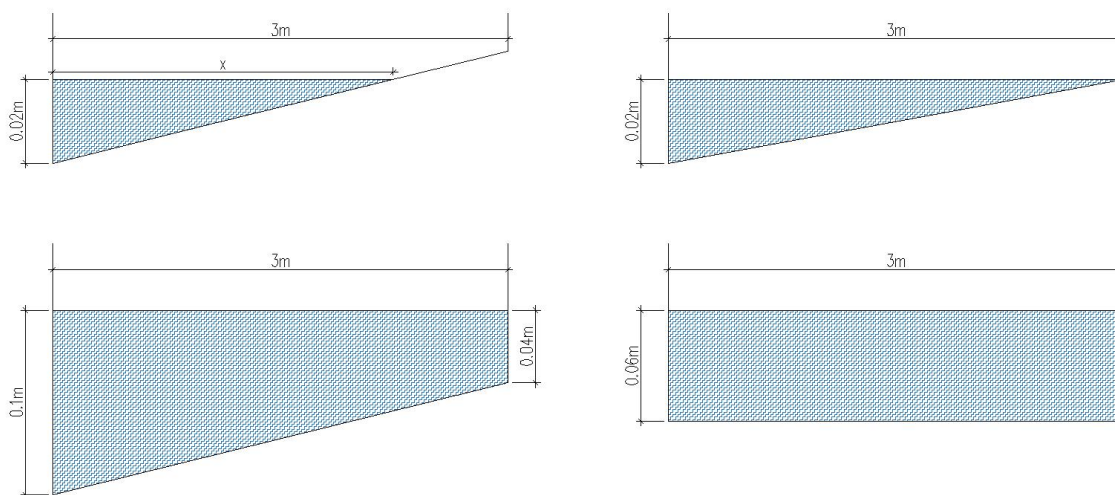


Imagen 9: Diferentes geometrías para el cálculo del caudal

Hemos calculado todos los caudales circulantes correspondientes a los calados de 1, 2, 3, 6, 8, 12 y 15 cm para las secciones con pendientes longitudinales del 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10% y para las pendientes transversales del 0, 2 y 4%.

Una vez obtenido el caudal circulante hemos sido capaces de calcular las eficiencias de captación con la ley potencial de captación nombrada anteriormente para cada una de las geometrías propuestas, así como de las rejillas escogidas. Teniendo en cuenta que se define la eficiencia como el cociente entre el caudal captado por la rejilla y el caudal circulante, hemos podido calcular el caudal captado por cada rejilla y geometría propuesta:

$$E = \frac{Q_{captado}}{Q_{circulante}}$$

Una vez obtenidos los caudales captados por cada geometría propuesta y rejilla escogida ya estábamos en disposición de calcular los coeficientes de desagüe como orificio a través de la ecuación:

$$Q_{captado} = Cd * A_h * \sqrt{2gE}$$

Donde:

- Cd es el coeficiente de desagüe que estamos buscando.
- A_h es el área de huecos de cada una de las rejillas.
- g es el valor de la gravedad terrestre.
- E es la energía que viene dada como:
-

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- y es el calado en metros.
- v es la velocidad dada por caudal circulante dividido por el área de la sección del flujo de agua en m/s.

El área de huecos del tipo de rejillas escogidas se encuentra recogida en la siguiente tabla:

Tipo de rejilla	2	5	8
Área huecos (m²)	0.0873	0.14	0.0852

Tabla 7: Área de huecos para las rejillas 2, 5 y 8

Finalmente, también hemos visto conveniente calcular el número de Froude para cada sección para así comprobar si existe alguna relación entre el Froude y el coeficiente de desagüe:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{B}}}$$

Donde:

- v es la velocidad de la lámina de agua en m/s.
- g es el valor de la gravedad terrestre en m/s².
- A es el área de la sección de flujo del agua en metros cuadrados.
- B es el ancho superficial de la lámina de agua en metros.

8. Análisis de los resultados

Una vez llevado a cabo todos los cálculos que nos han permitido encontrar el coeficiente de desagüe de orificio para cada geometría, calado y caudal, así como el número de Froude, hemos de pasar al análisis de los resultados.

8.1 Coeficiente de desagüe con geometrías de calle fijas

En un inicio probamos ver qué variación tenía el coeficiente de desagüe con el caudal circulante por la calle. En un inicio pensábamos que este aumentaría a medida que aumentaba el caudal circulante, pero ¿lo haría de forma indefinida? ¿Se comportaría igual con todas las rejillas estudiadas?

8.1.1 Coeficiente de desagüe en función del caudal de la calle con geometrías de calle fijas

Al representar en un gráfico dónde las ordenadas representan el caudal circulante y las abscisas el coeficiente de desagüe hemos obtenido estos resultados para una geometría fija para las rejillas 2, 5 y 8:

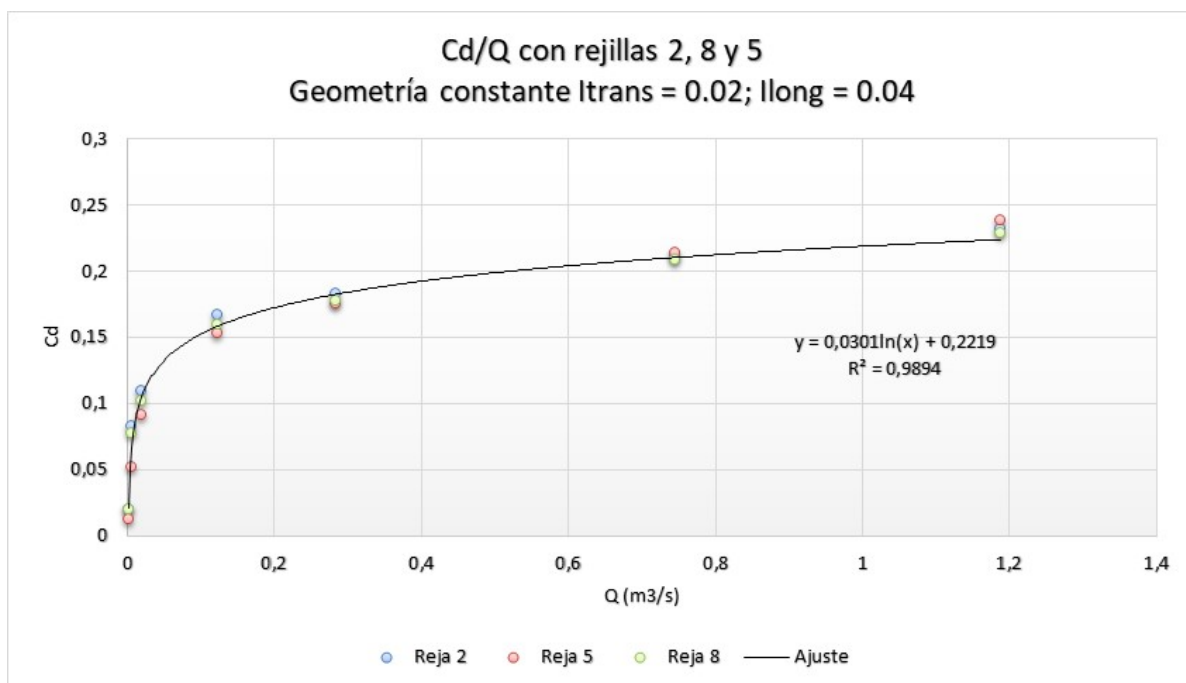


Gráfico 3: Cd/Q con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante

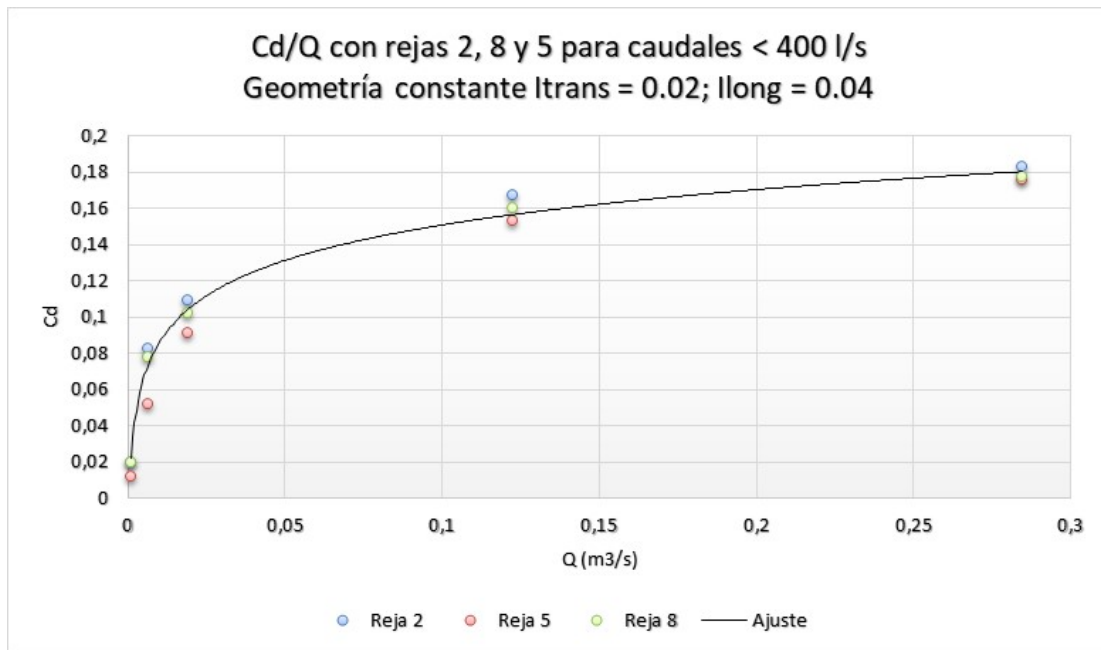


Gráfico 4: Cd/Q con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante y caudales < 400 l/s

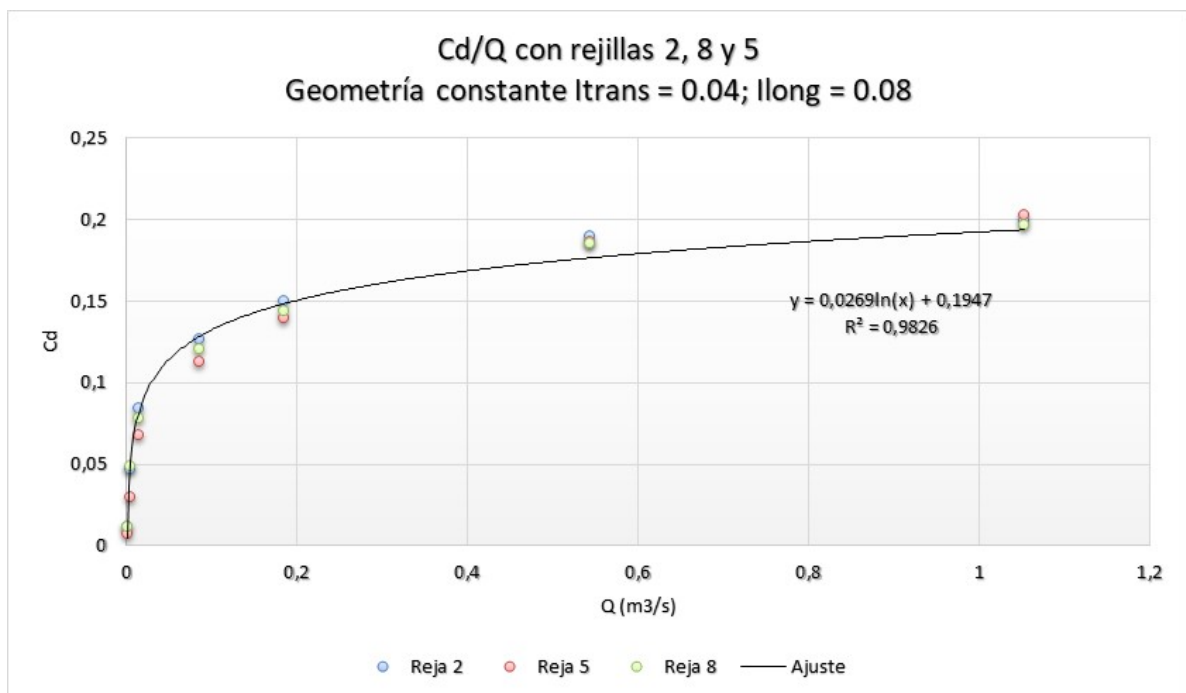


Gráfico 5: Cd/Q con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante

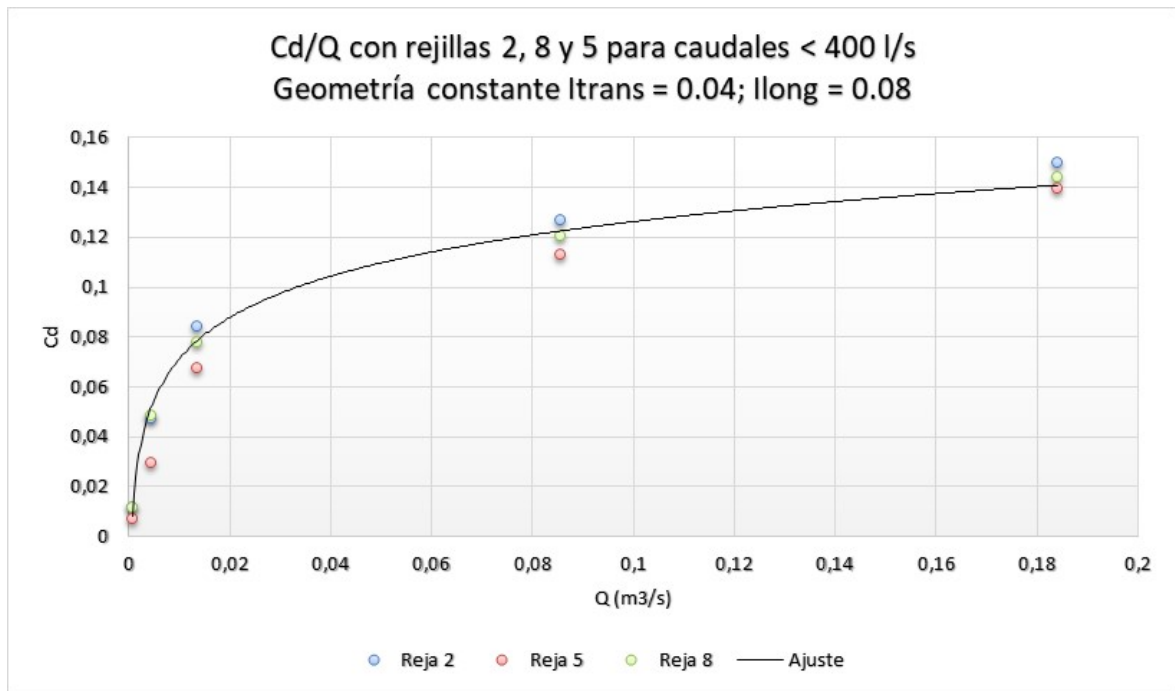


Gráfico 6: Cd/Q con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante y caudales < 400 l/s

Como vemos en los gráficos donde hemos representado el coeficiente de desagüe con el caudal circulante con unas geometrías constantes de pendiente transversal 0.02 y 0.04 y pendiente longitudinal 0.04 y 0.08 respectivamente sigue un ajuste logarítmico del tipo:

$$Cd = A \log(Q) + B$$

Donde los valores A y B dependen de la geometría considerada. Se consigue un ajuste logarítmico con unos coeficientes de correlación R^2 muy elevados, en estos casos concretos de 0.9894 y 0.9826, además de apreciar que el coeficiente de desagüe aumenta a medida que aumenta el caudal circulante, aumentando considerablemente en valores bajos de caudal y a medida que aumenta el caudal el coeficiente de desagüe lo hace con menor intensidad.

Se aprecia además que el valor del coeficiente de desagüe es casi el mismo para las 3 rejillas consideradas, donde 2 de las rejillas tienen un área de huecos similar pero la tercera tiene un área de casi el doble. Este hecho debería comprobarse con un mayor número de rejillas para poder definir un coeficiente de desagüe para todas ellas.

Para llevar a cabo esta comprobación graficamos todas las rejillas para una situación de geometría fija y obtuvimos el siguiente resultado:

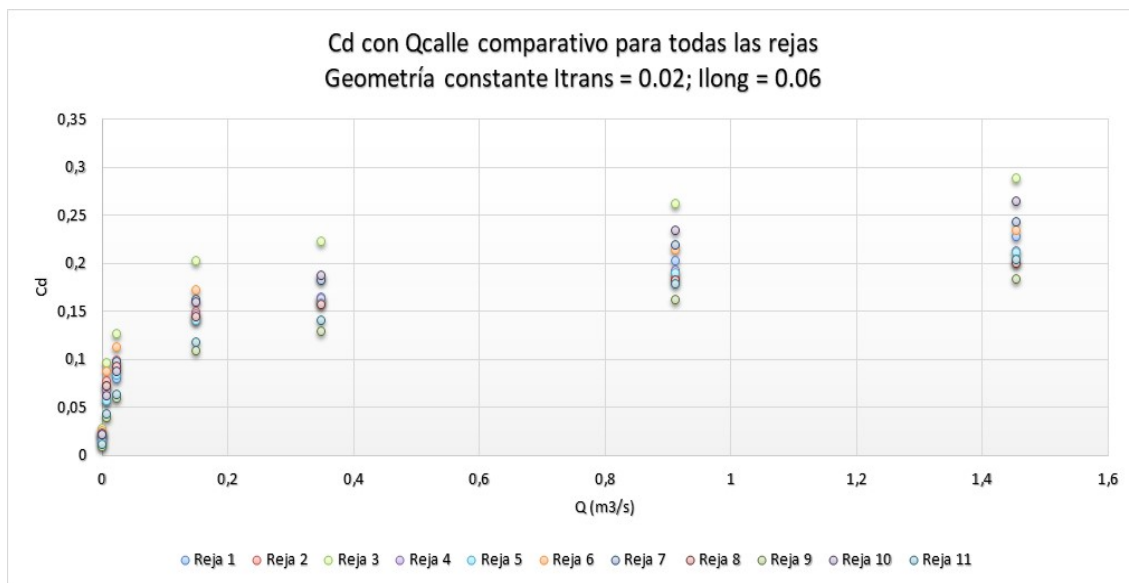


Gráfico 7: C_d con Q_{calle} de todas las rejass con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

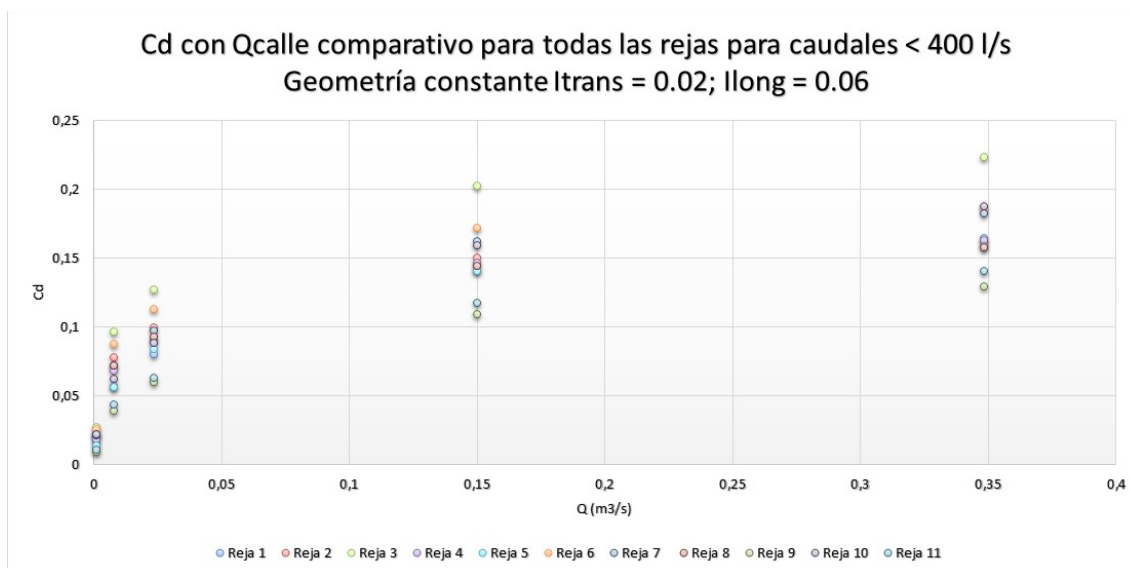


Gráfico 8: C_d con Q_{calle} de todas las rejass con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$ para caudales < 400 l/s

De esta forma comprobamos que, aunque para las rejass 2, 5 y 8 aún tener áreas de huecos distintas, los coeficientes de desagüe obtenidos eran muy parecidos, para la totalidad de las rejass estos coeficientes de desagüe no toman valores tan cercanos como en el caso anterior. Estas diferencias para algunos caudales son cercanas al 80% de variación entre una reja y otra.

Esa realidad nos hizo dudar a la hora de si era posible expresar en un ajuste logarítmico el coeficiente de desagüe para todas las rejass. Volvimos a graficar el coeficiente de desagüe para todas las rejass y trazamos este ajuste y obtuvimos este resultado:

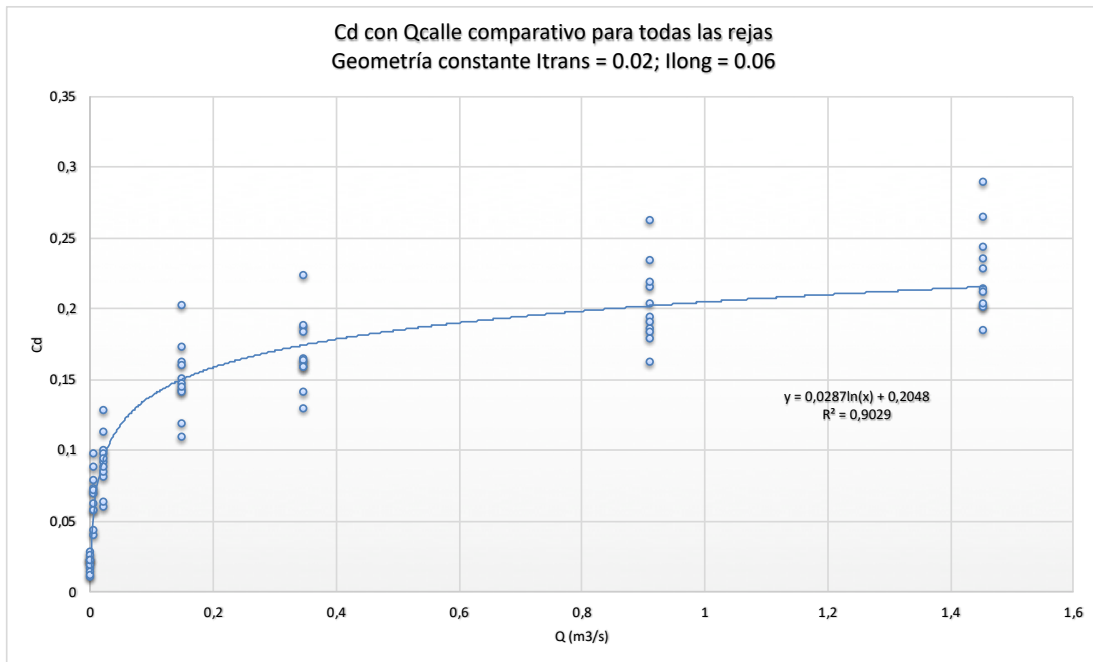


Gráfico 9: Cd con Qcalle de todas las rejass con ltrans = 0.02; llong = 0.06

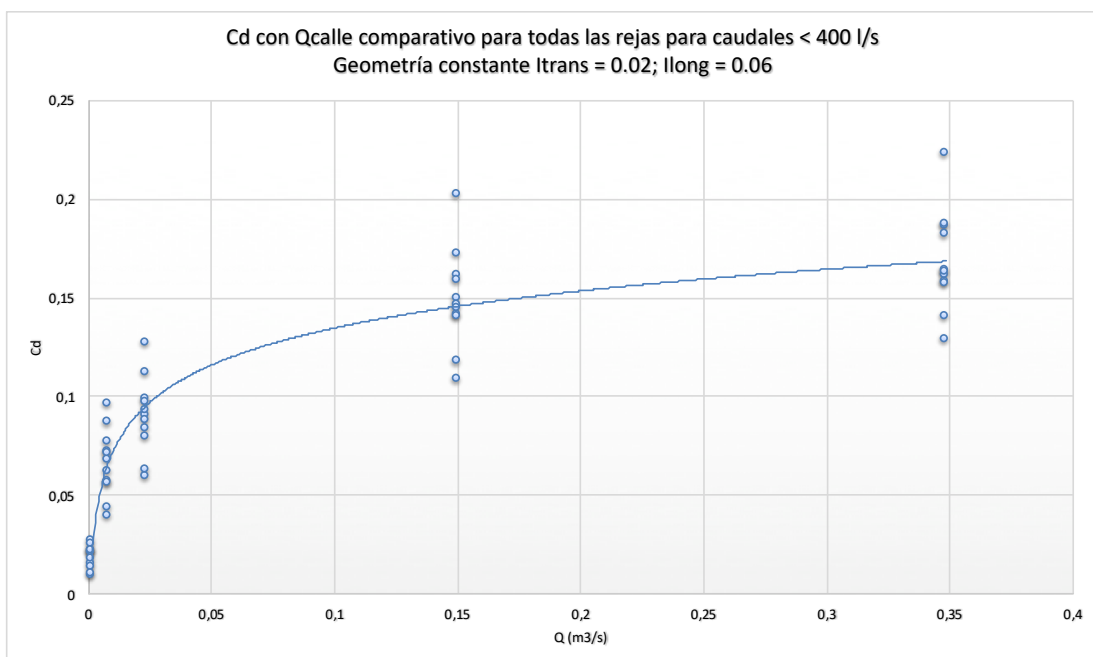


Gráfico 10: Cd con Qcalle de todas las rejass con ltrans = 0.02; llong = 0.06 para caudales < 400 l/s

Vemos que nos sale un ajuste del tipo logarítmico donde los coeficientes A y B dependen de la geometría de la calle. Al estudiar todas las rejass obtenemos una correlación mucho más baja que con las rejass 2, 5 y 8 de 0.9029.

Si nos fijamos en la gráfica para valores de caudal pequeños este ajuste podría ser válido, pero a medida que los caudales aumentan este ajuste pierde validez ya que nos da resultados para algunas rejass con diferencias de hasta un 30%.

Valoramos entonces, trazar un ajuste para cada una de las rejillas. Este ajuste nos va a permitir predecir los coeficientes de desagüe para cada caudal sabiendo la geometría de la calle tal y como se aprecia en la siguiente gráfica:

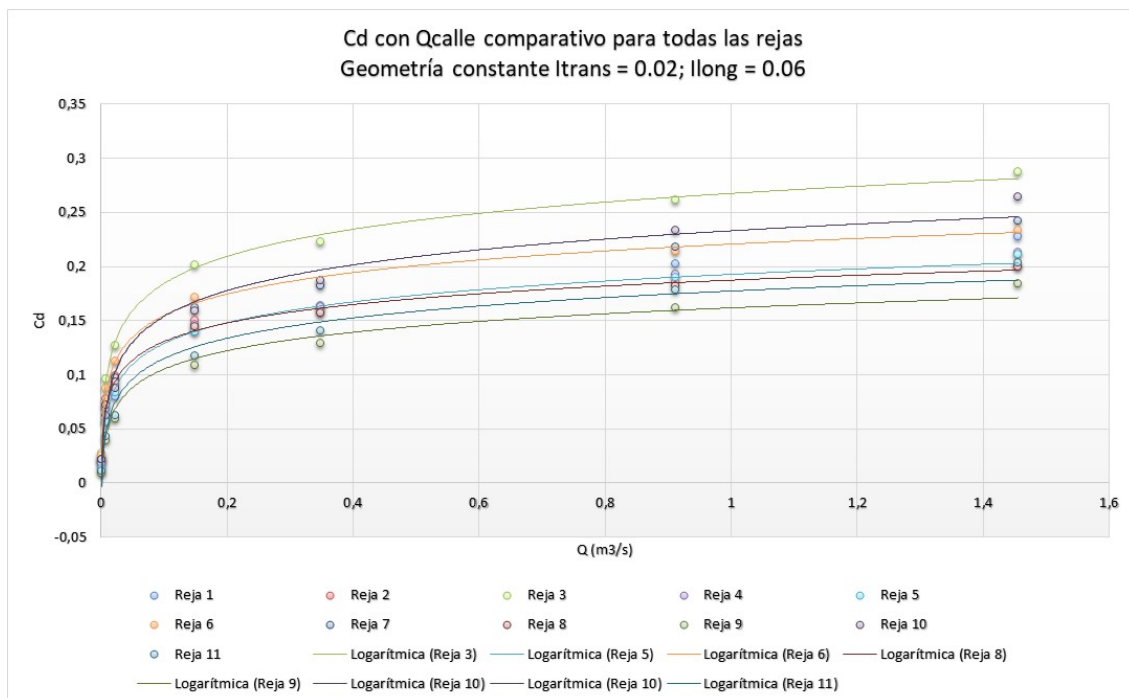


Gráfico 11: C_d con Q_{calle} de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

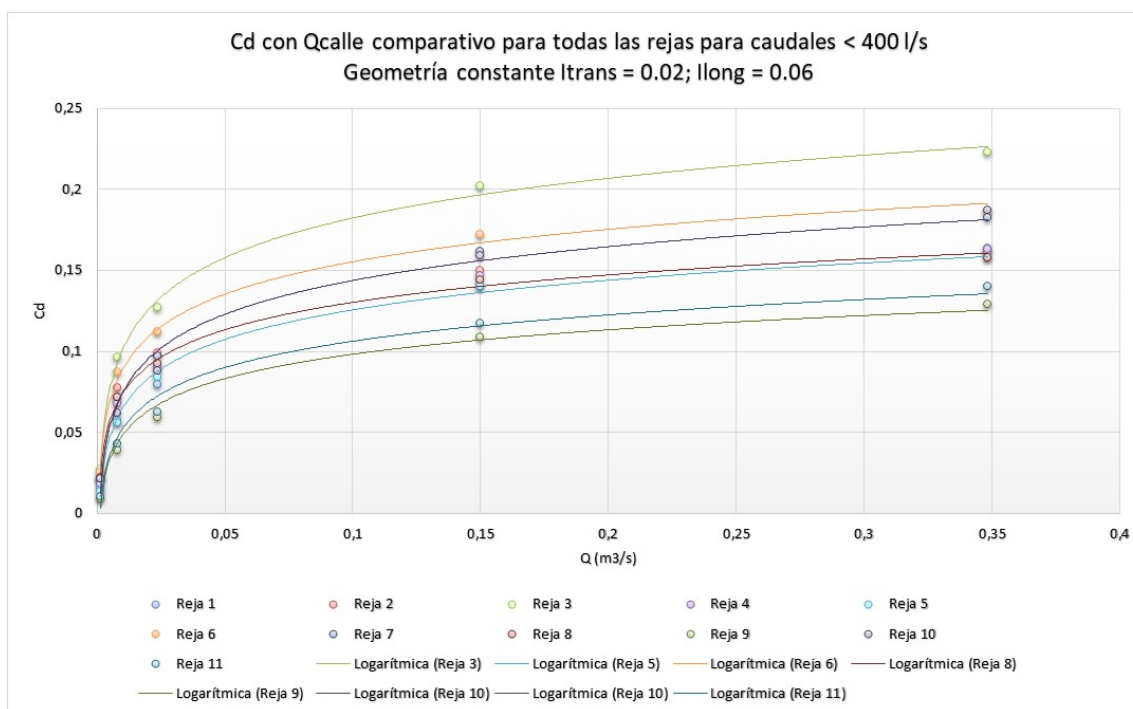


Gráfico 12: C_d con Q_{calle} de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$ para caudales < 400 l/s

Aunque consideramos más preciso utilizar un ajuste logarítmico para cada una de las rejillas conociendo la geometría de la calle, vemos que el ajuste logarítmico único para todas las rejillas anteriormente descrito podría llegar a usarse si no lo usáramos para las rejillas 3, 9 y 11. Para comprobarlo decidimos volver a graficar todas las rejillas obviando las rejillas 3, 9 y 11 y obtuvimos el siguiente resultado:

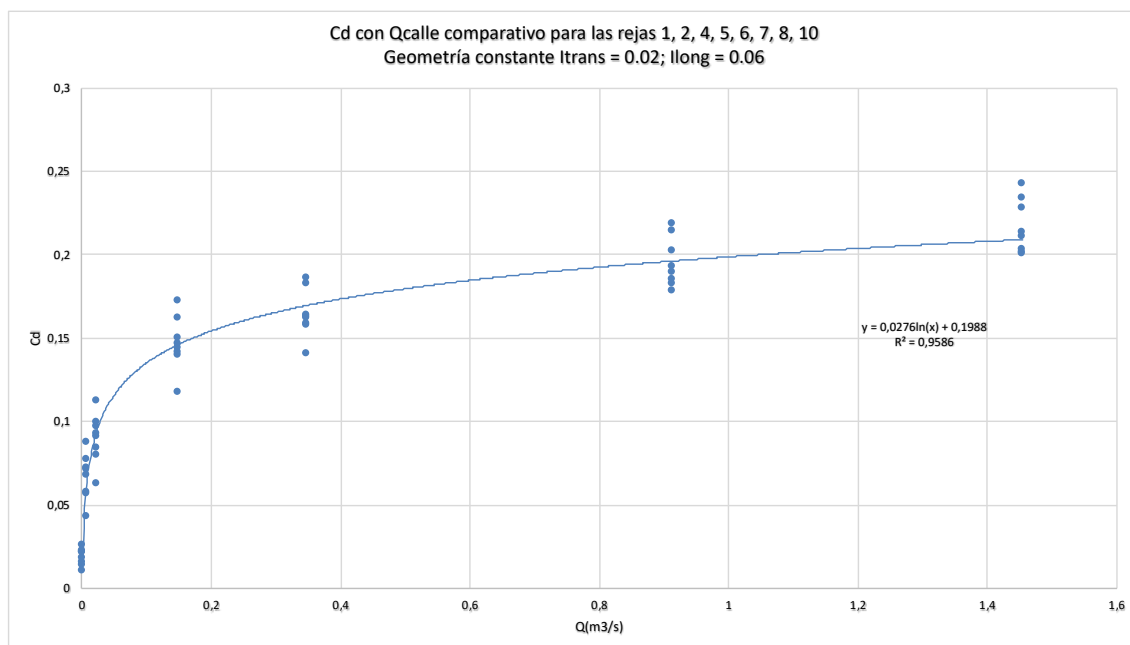


Gráfico 13: Cd con Qcalle para las rejillas 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 con ltrans = 0.02; llong= 0.06

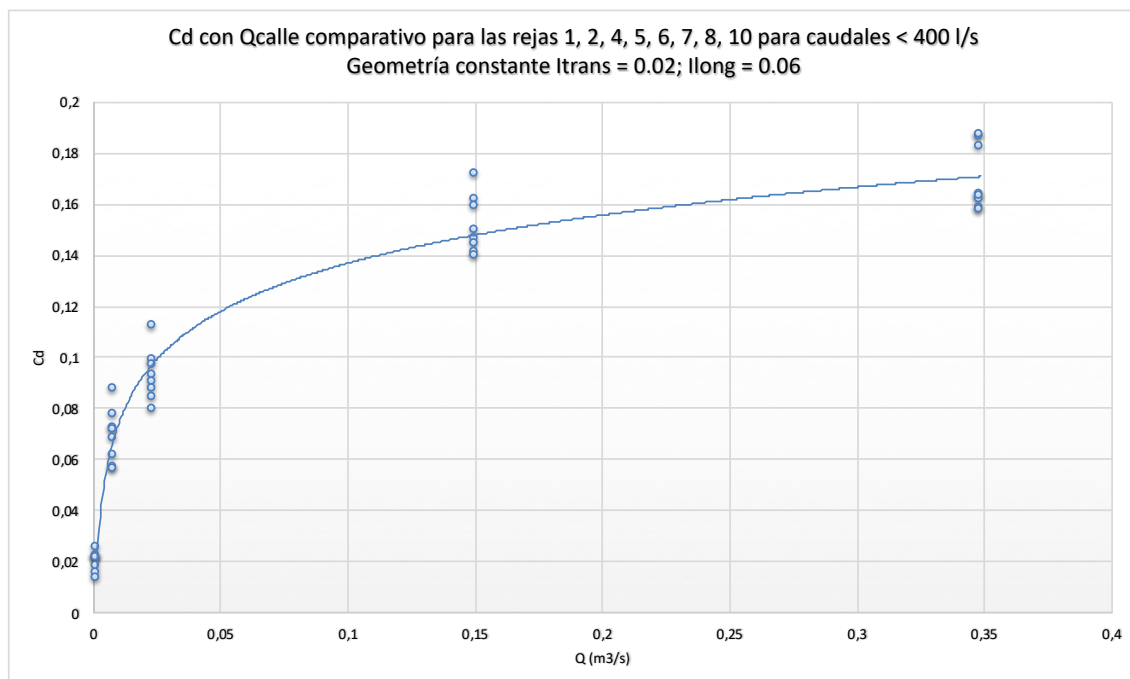


Gráfico 14: Cd con Qcalle para las rejillas 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 con ltrans = 0.02; llong= 0.06 para caudales < 400 l/s

Vemos que el ajuste logarítmico no es tan preciso como si lo usáramos para una reja y una geometría concreta, pero que éste mejora considerablemente al eliminar estas tres rejillas.

8.1.2 Coeficiente de desagüe en función del caudal captado con geometrías de calle fijas

Hemos querido también hacer el mismo estudio con el caudal intervenido por las rejillas en el eje de abscisas y el coeficiente de desagüe para geometrías constantes, obteniendo los resultados siguientes:

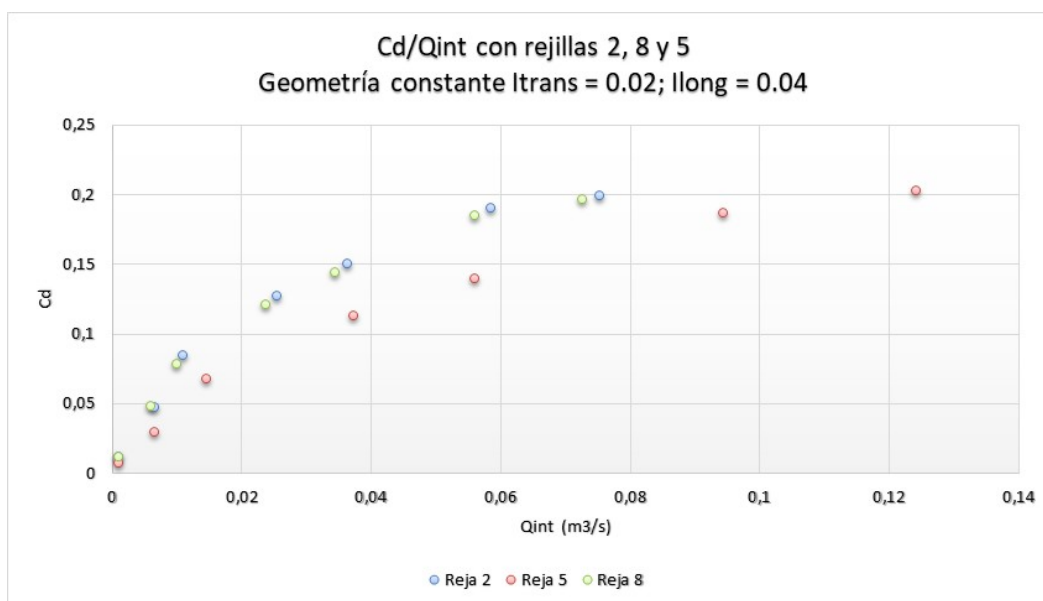


Gráfico 15: Cd/Q_{int} con rejillas 2,8 y 5 con geometría constante

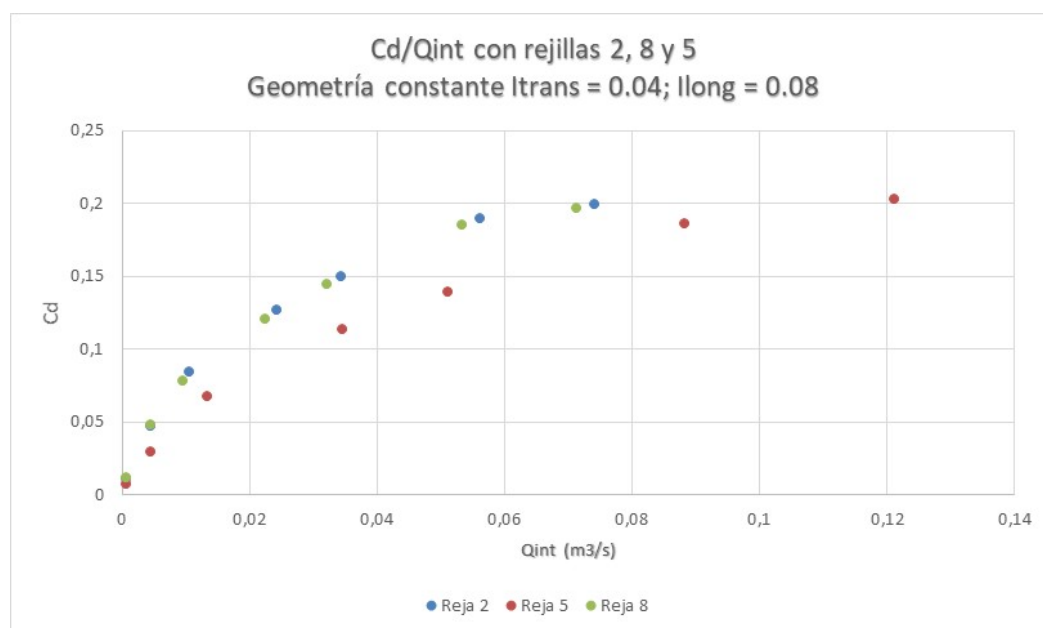


Gráfico 16: Cd/Q_{int} con rejillas 2,8 y 5 con geometría constante

Como vemos en los gráficos la correlación logarítmica sigue igual que con el caudal circulante, pero se reduce un ápice la correlación R^2 hasta los 0.9403 y 0.9066 respectivamente, manteniéndose elevado, considerándose así un buen ajuste.

8.1.3 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle fijas

Finalmente hemos querido comparar el coeficiente de desagüe con el cociente Q/y con el que se ha trabajado en tantas ocasiones para hacer diferentes estudios experimentales y donde se extrajo los ajustes potenciales de la eficiencia de cada reja. Los resultados obtenidos para una geometría constante han sido los siguientes:

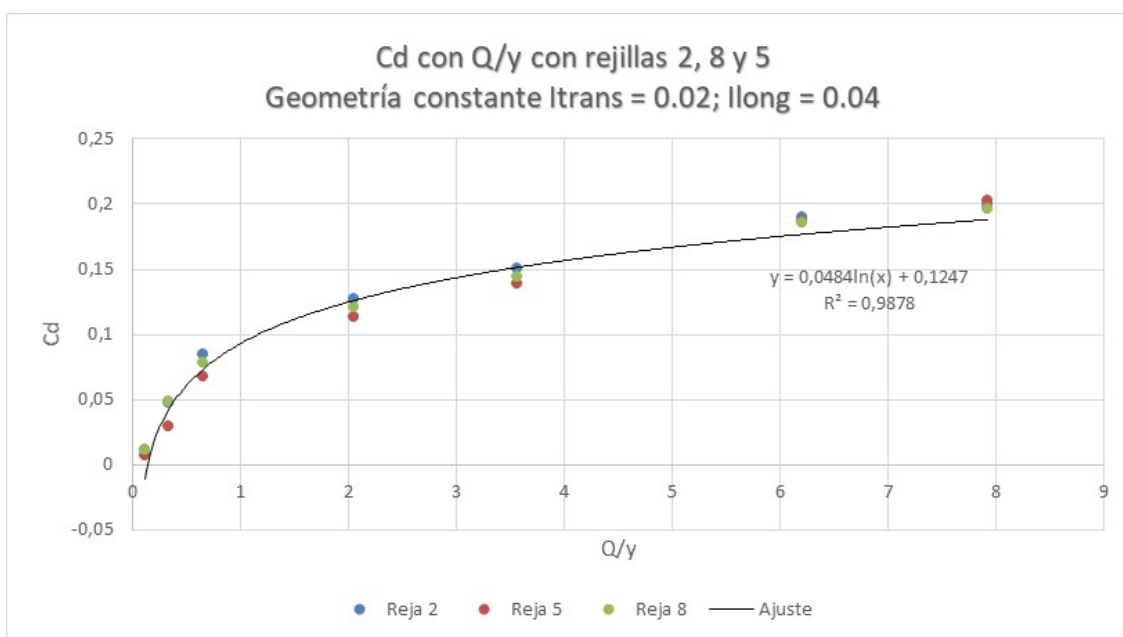


Gráfico 17: C_d con Q/y con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante

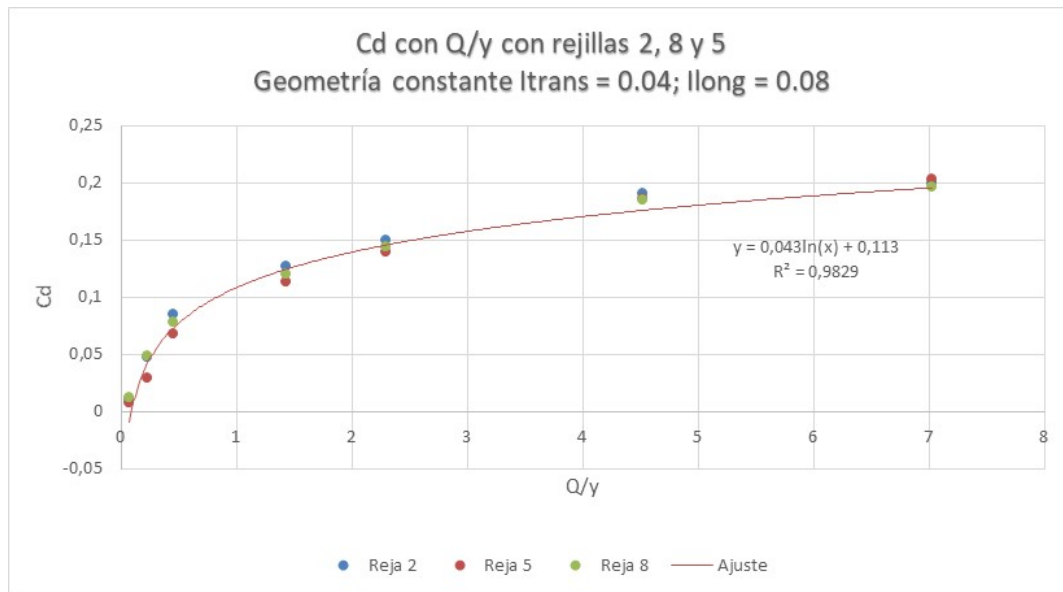


Gráfico 18: Cd con Q/y con rejillas 2, 8 y 5 con geometría constante

Los resultados obtenidos han sido muy parecidos a los dos anteriores, sobretodo cuando comparábamos el coeficiente de desagüe con el caudal de la calle. El coeficiente de desagüe tiene una fuerte correlación logarítmica con el cociente Q/y cuando comparamos las rejillas 2, 5 y 8, dónde dos de ellas tenían un área de huecos parecida pero la otra era casi del doble, ¿pero podemos definir un solo ajuste logarítmico para todas las rejillas?

Volvimos a graficar todas las rejillas, pero esta vez en relación a la ratio Q/y, obteniendo el siguiente resultado:

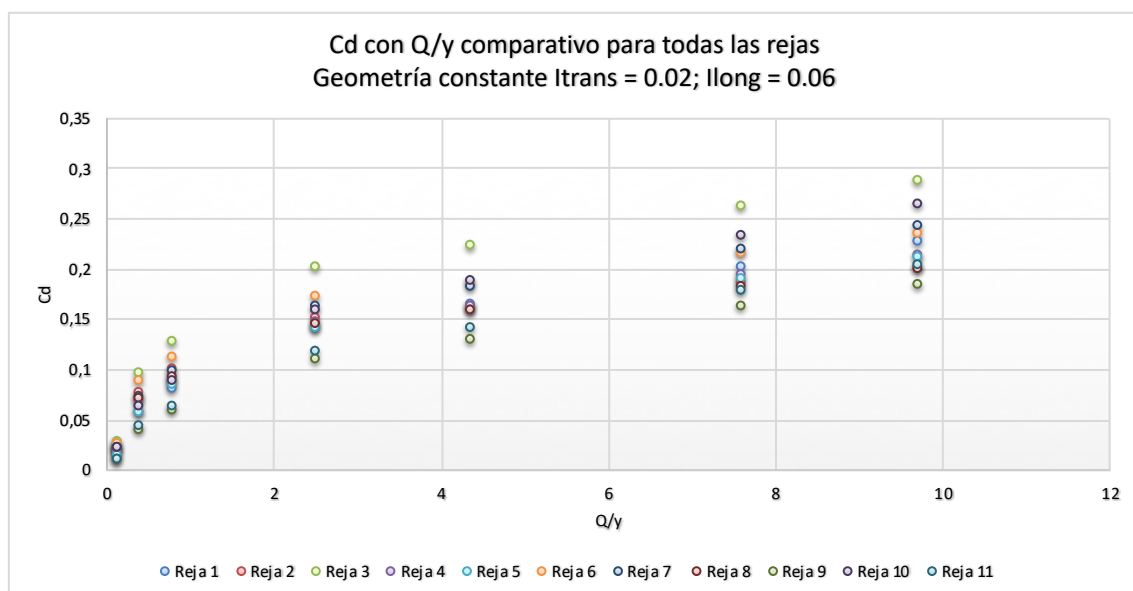


Gráfico 19: Cd con Q_{calle} de todas las rejillas con l_{trans} = 0.02; l_{long} = 0.06

Como en la situación donde comparábamos el coeficiente de desagüe con el caudal de la calle, vemos que al comparar todas las rejillas que, los coeficientes de desagüe entre ellas para valores elevados de la ratio Q/y , son bastante distintos entre ellos, siendo difícil definir un único ajuste lineal que sirviera para todas las rejillas.

De todos modos, quisimos graficar esta situación y dejar descrito este ajuste para una geometría fija tal y como hicimos en el primer caso. Obtuvimos este resultado:

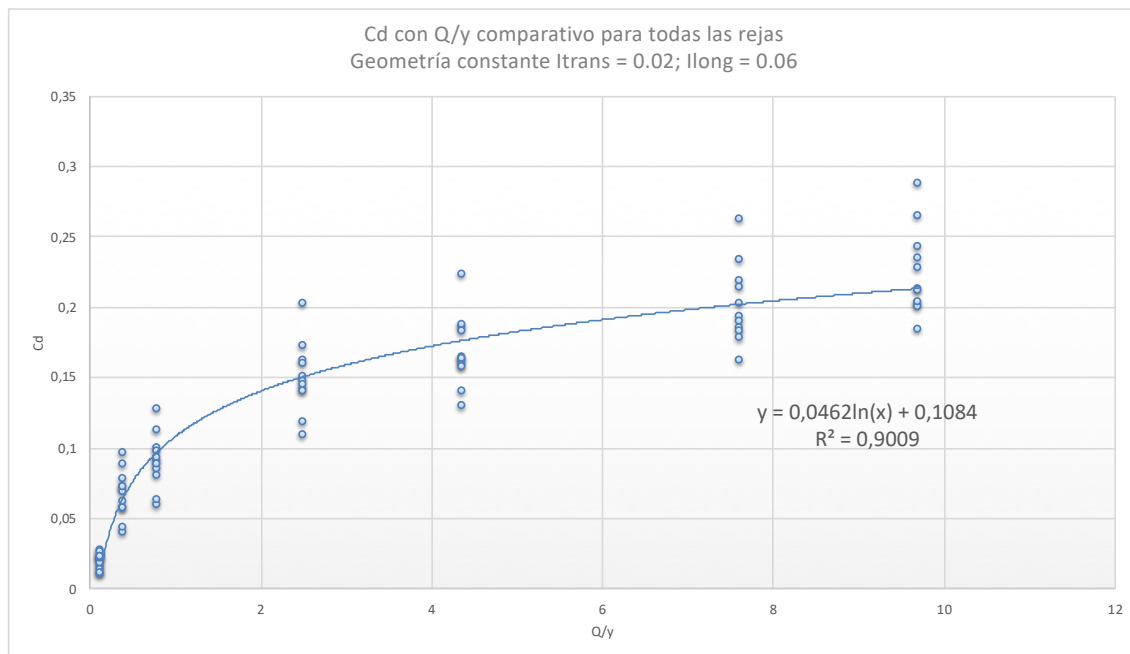


Gráfico 20: Cd con Q_{calle} de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

Vemos que para ratios Q/y muy bajas, los resultados estimados por el ajuste nos dan valores bastante representativos, pero a medida que la ratio Q/y aumenta apreciamos que las predicciones que nos da el ajuste logarítmico distan de los valores ensayados.

Esta realidad nos obliga a representar un ajuste para cada una de las rejillas para cada geometría de la calle. Graficamos otra vez todas las rejillas diferenciadas y, a modo de ejemplo, trazamos el ajuste lineal de algunas de ellas para ver que sus correlaciones eran muy elevadas. Vemos el resultado en el siguiente gráfico:

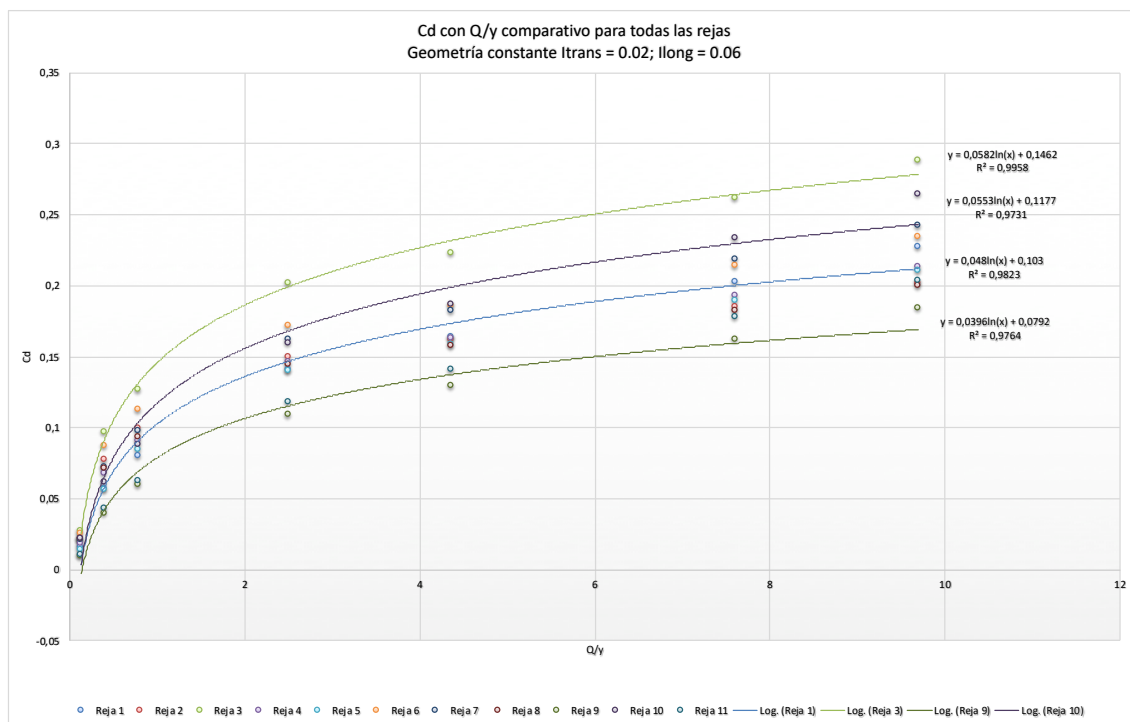


Gráfico 21: Cd con Qcalle de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

Finalmente, trazamos un ajuste logarítmico eliminando las rejillas con las que obteníamos valores de desagüe extremos en comparación de las demás y obtuvimos el siguiente resultado:

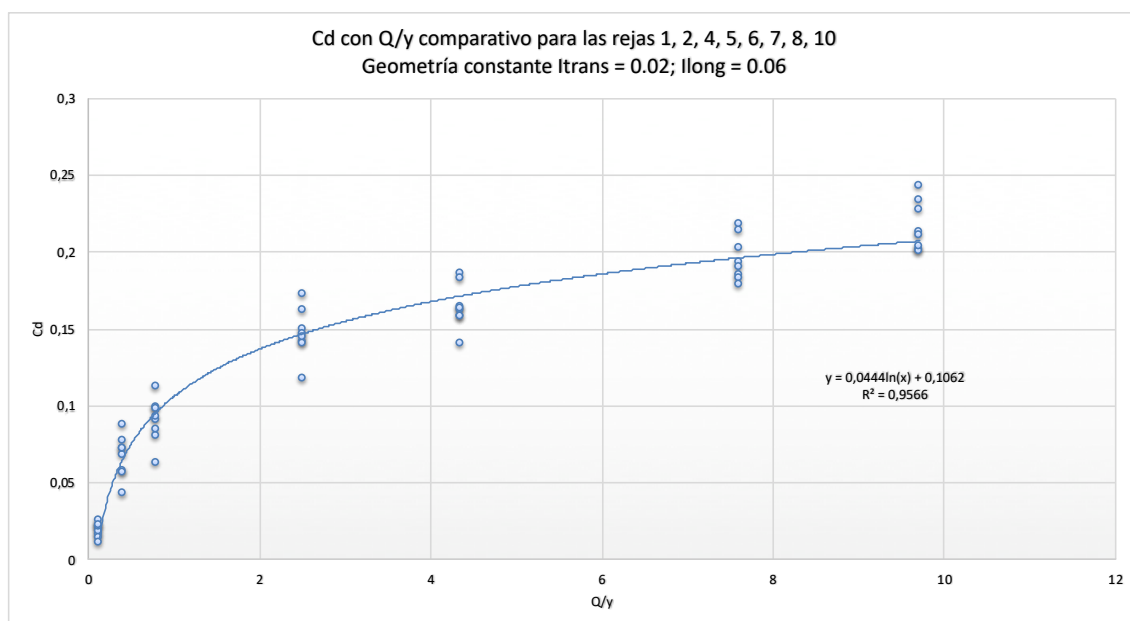


Gráfico 22: Cd con Qcalle de todas las 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

Vemos que al eliminar las rejillas 3, 9 y 11 obtenemos un ajuste logarítmico para cada geometría de la calle que ha pasado de una correlación de 0.9009 para todas las rejillas a 0.9566 al eliminar

estas tres rejas. Aunque consideramos más preciso usar un ajuste para cada una de las rejas y geometría, este ajuste único al eliminar las rejas 3, 9, 11 no es malo del todo.

8.2 Coeficiente de desagüe con geometrías de calle variables

8.2.1 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal

Hemos visto que existe una relación logarítmica ya sea con el caudal circulante, el intervenido o el cociente Q/y , dónde aumenta el coeficiente de desagüe a medida que aumenta el caudal en geometrías fijas, pero este ajuste es diferente en cada geometría, por lo tanto, sería también interesante ver como se desplaza este ajuste logarítmico para cada geometría fija. Al ver que el comportamiento del coeficiente de desagüe en cada reja era igual usamos la reja 2 para evitar un exceso de puntos que no nos permitieran analizar la situación descrita. Utilizamos el cociente Q/y ya que cualquiera de las tres situaciones nos hubiera servido, mantuvimos la pendiente transversal fija y variamos la pendiente longitudinal, graficando así cada uno de los ajustes logarítmicos en un gráfico, obteniendo este resultado:

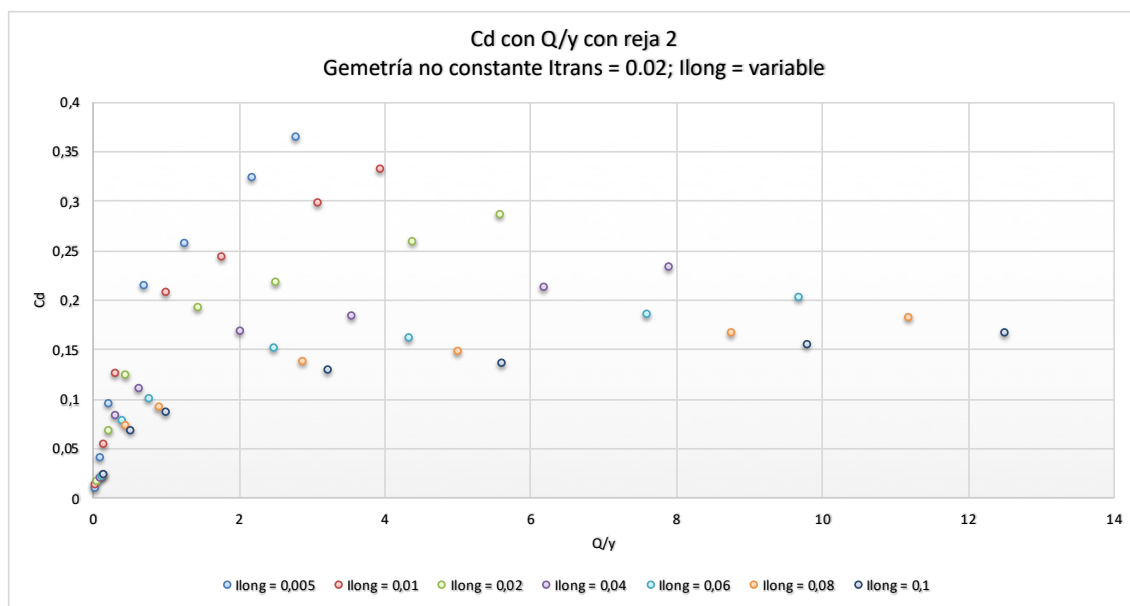


Gráfico 23: Cd con Q/y con reja 2 con $I_{trans} = 0.02$; $l_{long} = variable$

Como vemos en el gráfico, los ajustes logarítmicos que encontramos al trabajar con el coeficiente Q/y y con el coeficiente de desagüe para geometrías fijas se desplazan para abajo y a la derecha a medida que la pendiente longitudinal aumenta. Para pendientes más pequeñas obtenemos coeficientes de desagüe más elevados y para pendientes más altas obtenemos coeficientes de desagüe más bajos, sin dejar de perder este ajuste logarítmico para cada una de las geometrías fijas. Al graficar esta situación vimos algo que nos llamó la atención, nos dimos

cuenta que ciertos puntos se agrupaban en líneas cuasi rectas y paralelas entre ellas, realidad que estudiamos a continuación cuando nos dispusimos a variar ciertas geometrías.

8.2.2 Coeficiente de desagüe en función del caudal circulante con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal

Como hemos comentado anteriormente, después de estos primeros resultados nos preguntamos cómo se comportaría el coeficiente de desagüe con el caudal circulante manteniendo la pendiente transversal de la calle constante pero la pendiente longitudinal de esta variable con valores del 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10%. Al tratarse de muchos más datos de estudio primero decidimos estudiar cómo se comportaba con la rejilla 2. A modo de ejemplo exponemos los resultados obtenidos con una pendiente transversal fija del 2% y la rejilla 2:

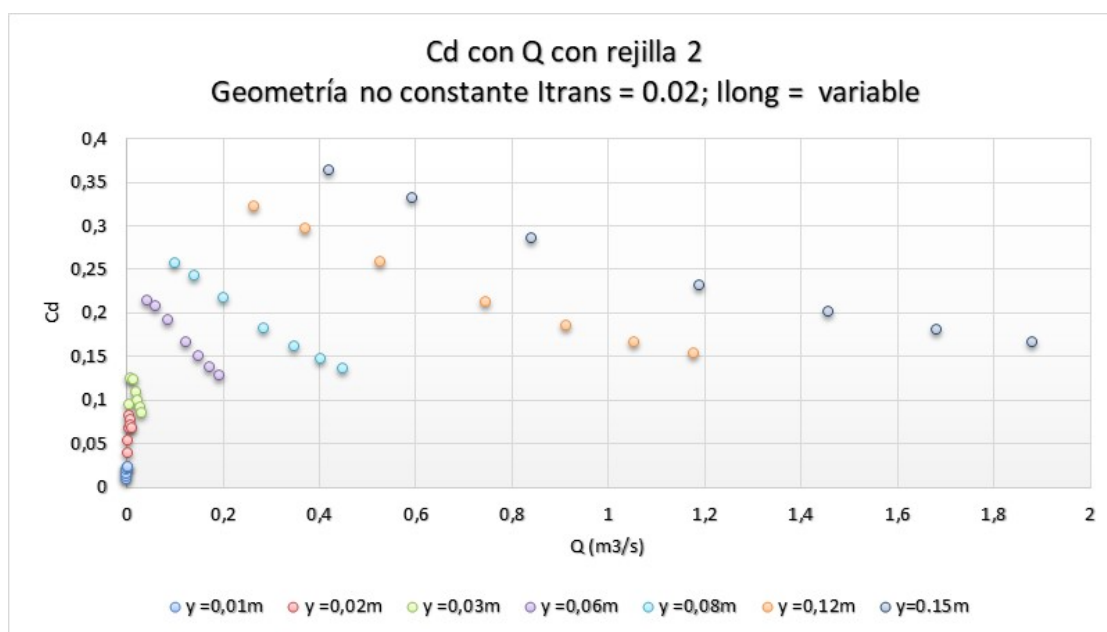


Gráfico 24: Cd con Q con rejilla 2 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = \text{variable}$

En el gráfico vemos del mismo color los calados del mismo valor, donde se aprecia que para mantener el mismo valor de calado se necesita un aumento de caudal, significando pues, que la pendiente longitudinal aumenta de izquierda a derecha en el gráfico y que el coeficiente de desagüe disminuye con este aumento de pendiente.

Estas agrupaciones en forma casi de línea recta se agrupan paralelamente por cada valor de mismo calado.

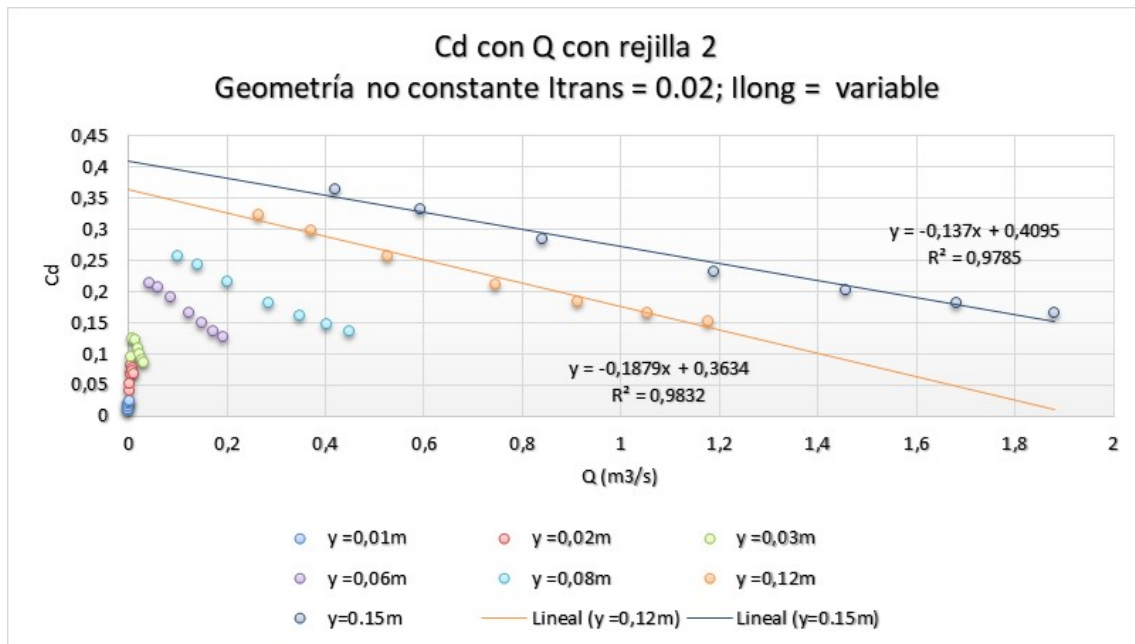


Gráfico 25: Cd con Q con reja 2 con l_{trans} = 0.02; l_{long} = variable

Como vemos en el gráfico los valores de coeficiente de desagüe para un mismo calado se ajustan linealmente con coeficientes de correlación altos, casi cercanos a 1, al aumentar la pendiente longitudinal y mantener el mismo calado el caudal debe aumentar. Esta realidad hace que el coeficiente de desagüe disminuya linealmente a medida que la pendiente longitudinal y el caudal aumenta si se mantiene el mismo valor de calado. Es importante también recalcar que cuando más elevado es el calado estos ajustes lineales se sitúan más a la derecha y arriba en el gráfico. También podemos apreciar que en valores de calado y caudal muy pequeños todos los puntos quedan un poco difuminados dando valores menos representativos.

Una vez hecho el estudio con la reja 2 hemos querido comprobar si tenía el mismo resultado graficando la misma situación con cada una de las rejillas, la 2, la 5 y la 8, obteniendo este resultado:

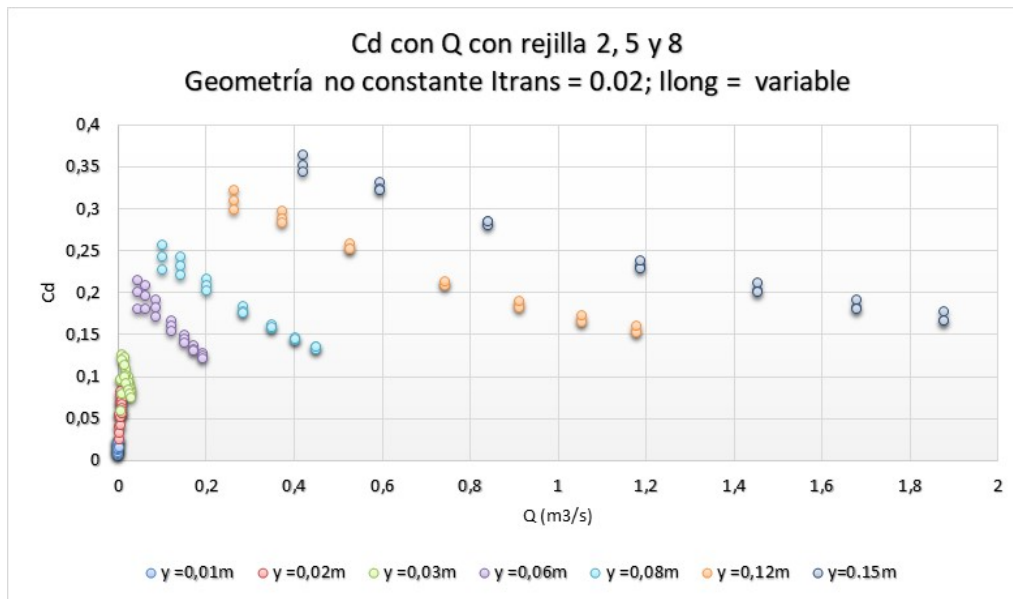


Gráfico 26: Cd con Q con reja 2, 5 y 8 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = \text{variable}$

Se aprecia claramente el mismo comportamiento que en la situación anterior, un ajuste lineal descendente del valor del coeficiente de desagüe con el caudal circulante cuando el calado se mantiene igual y la pendiente longitudinal la variamos. De nuevo, esta variación es la misma para las tres rejillas, recordando que dos tienen un área de huecos similar pero la otra es casi del doble. ¿Esta variación será igual para todas las rejillas?

Para evitar un exceso de puntos, pero a la vez comprobar como funciona esta variación decidimos coger un conjunto de puntos de calado igual con aumento de caudal a medida que aumenta la pendiente longitudinal y ver si todas las rejillas se superponen o no. El resultado fue el siguiente:

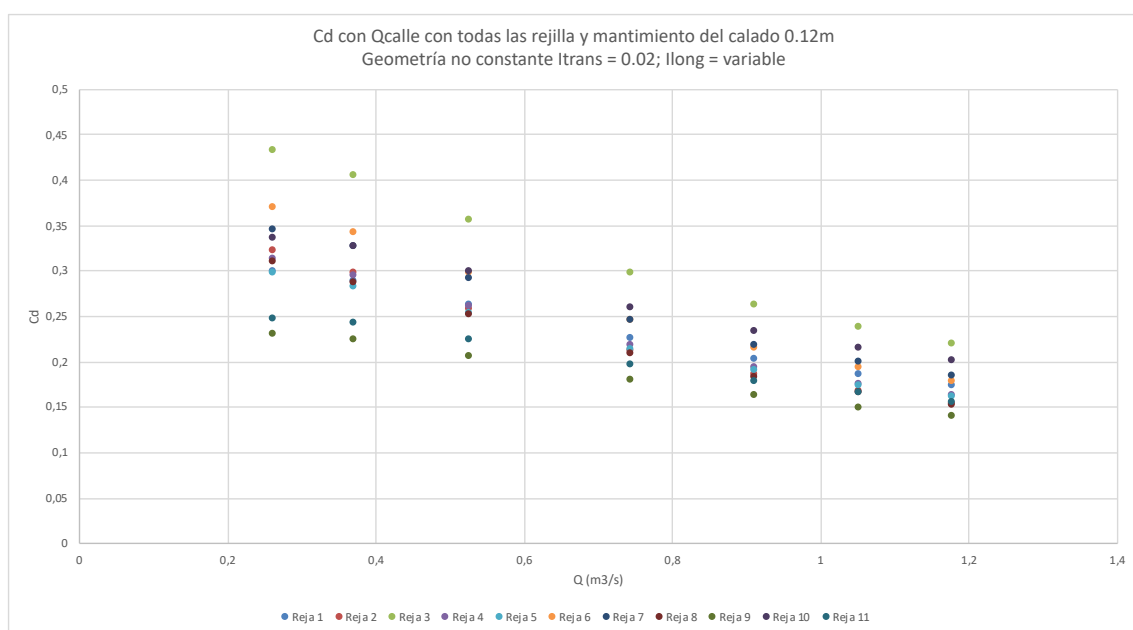


Gráfico 27: Cd con Qcalle con todas las rejillas y calado 0.12 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = \text{variable}$

Igual que pasaba anteriormente no es posible expresar esta variación del coeficiente de desagüe a medida que aumenta la pendiente longitudinal con un único ajuste lineal, ya que, para ciertas geometrías, hay hasta un 100% de diferencia entre algunas rejillas.

Al trazar este gráfico también vimos una cosa interesante, a medida que la pendiente longitudinal aumenta las diferencias de coeficiente de desagüe entre rejillas disminuyen, siendo muy amplias para pendientes longitudinales pequeñas y menos amplias para pendientes longitudinales elevadas.

De todos modos, quisimos comprobar como sería un ajuste lineal para todas las rejillas y después compararlo con un ajuste lineal eliminando las rejillas 3, 9 y 11 que son las que dan valores más extremos de coeficiente de desagüe, obteniendo este resultado:

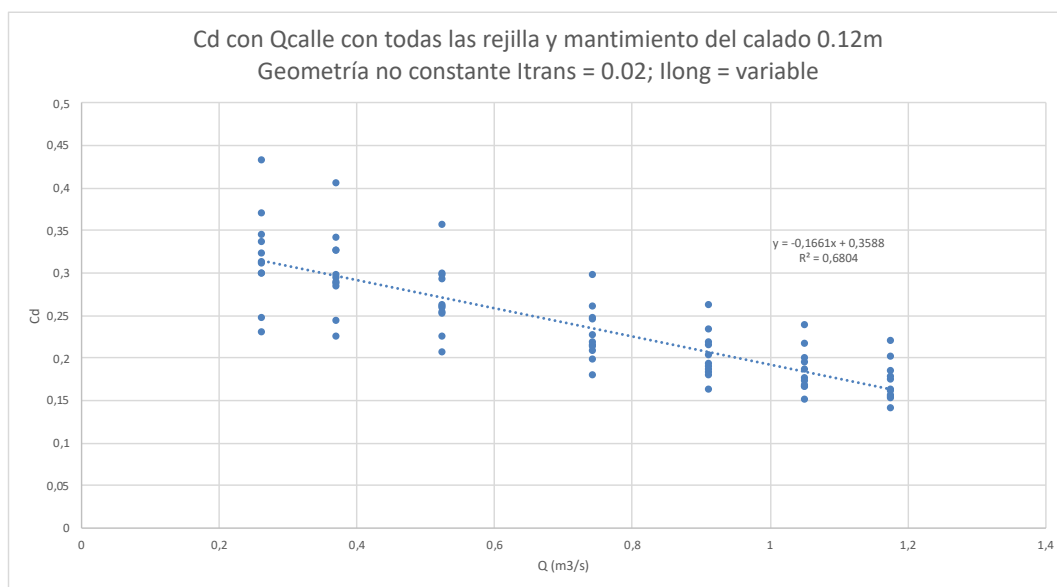


Gráfico 28: Cd con Qcalle con todas las rejillas y calado 0.12 con ltrans = 0.02; llong = variable

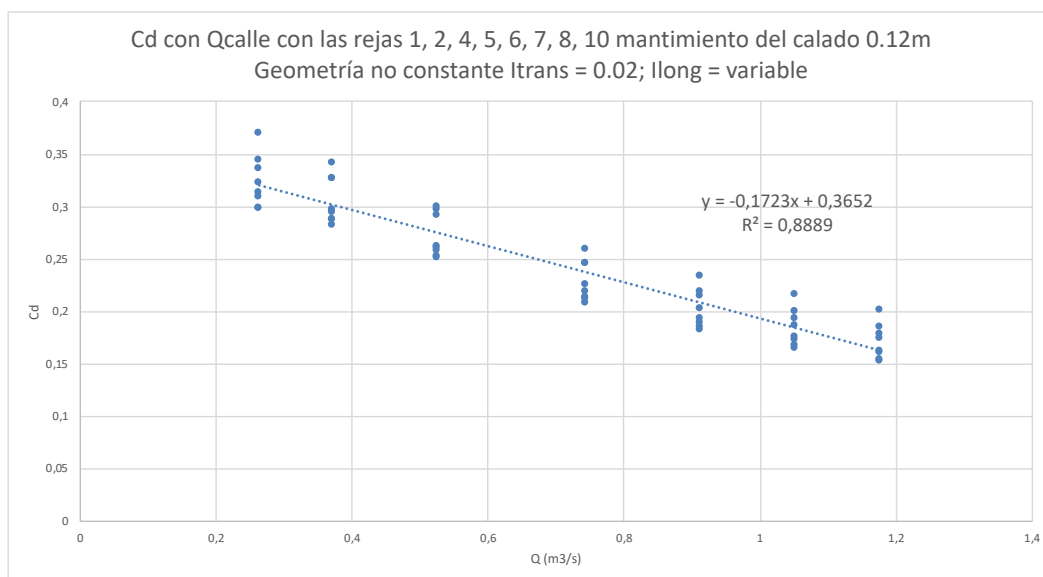


Gráfico 29: Cd con Qcalle con rejillas 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y calado 0.12 con ltrans = 0.02; llong = variable

Vemos que al eliminar las rejillas 3, 9 y 11 la correlación lineal pasa de 0.6804 a 0.8889.

8.2.3 Coeficiente de desagüe en función del caudal captado con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal

A continuación, decidimos hacernos las mismas preguntas en la misma situación geométrica, es decir, manteniendo la pendiente transversal fija y variando la pendiente longitudinal para los mismos valores anteriores pero esta vez con el caudal intervenido por cada una de las rejillas, obteniendo el siguiente resultado a modo de ejemplo para la rejilla 2 y pendiente transversal fija de 0.02:

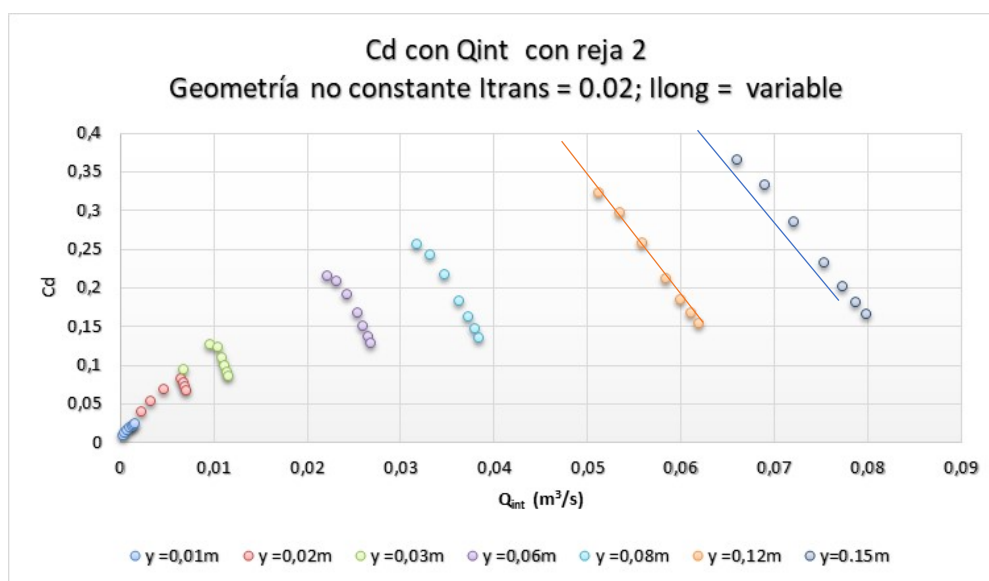


Gráfico 30: C_d con Q_{int} con rejilla 2 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = variable$

Los resultados son bastante parecidos a los anteriores. Los valores de los coeficientes asociados al mismo valor de calado se ajustan linealmente de forma descendente, a medida que aumenta la pendiente vertical, también aumenta el caudal y disminuye el coeficiente de desagüe. Estos ajustes tienen un R^2 muy cercano a 1 y se ajustan con rectas muy paralelas para cada valor de calado fijo. Igual que con el caudal circulante, estos ajustes pierden precisión para valores de calado y caudal muy pequeños.

Igual que en la situación anterior quisimos ver si este comportamiento se mantenía al graficar esta situación con las rejillas estudiadas, obteniendo este resultado:

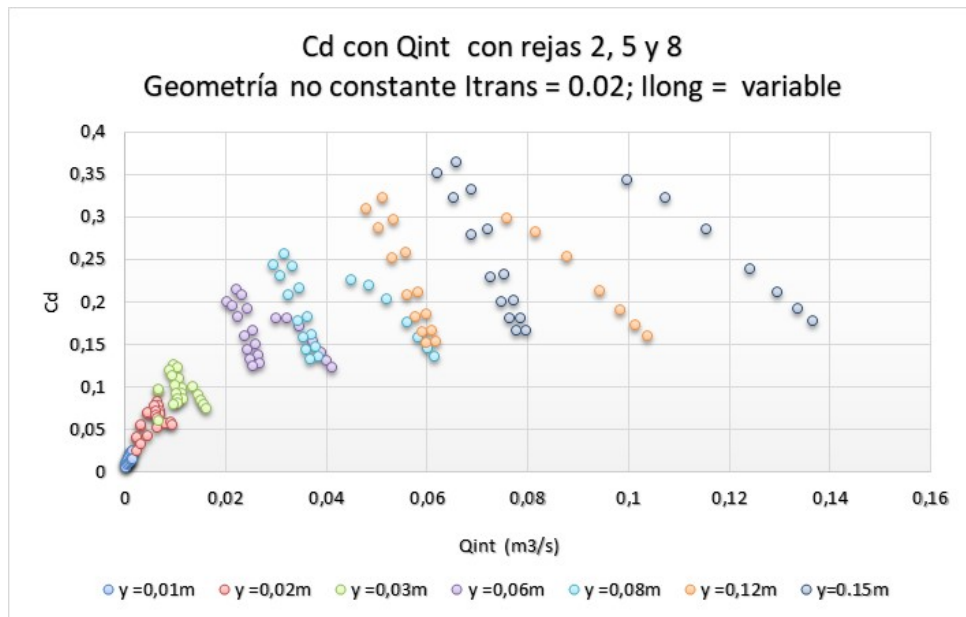


Gráfico 31: Cd con Q_{int} con reja 2, 5 y 8 con l_{trans} = 0.02; l_{long} = variable

En este caso al graficar lo que sucede al relacionar el coeficiente de desagüe con el caudal intervenido para cada una de las rejas vemos unas características parecidas a las anteriores, pero hay una de las rejas que intercepta más caudal que las otras dos y el ajuste lineal entre calados del mismo nivel se ve desplazado hacia la derecha. También se ve algo modificado el pendiente de este ajuste lineal respecto a las otras dos rejas perdiendo el cuasi paralelismo que se mantenía en el caudal circulante. También apreciamos que en esta misma reja la correlación lineal descendente existe y es elevada, pero algo más baja que en las dos primeras rejas.

8.2.4 Coeficiente de desagüe en función de la ratio Q/y con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal

Finalmente hicimos el mismo análisis que cuando trabajamos con geometría fija, dónde comparamos el coeficiente de desagüe con el cociente Q/y, obteniendo los siguientes resultados para una pendiente transversal del 2% y una pendiente longitudinal variable en la reja 2:

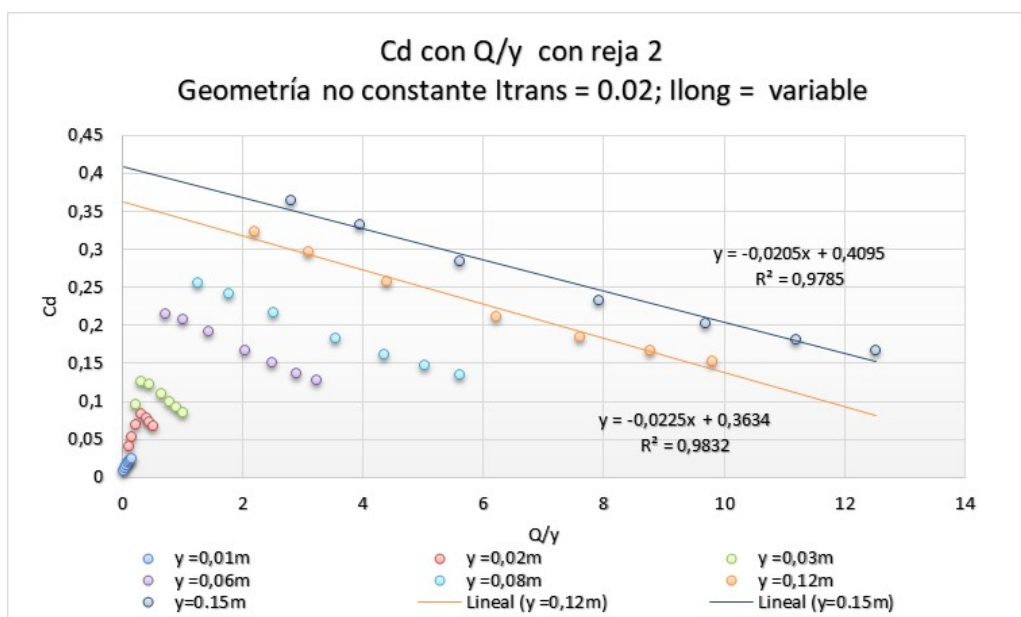


Gráfico 32: Cd con Q/y con reja 2, 5 y 8 con ltrans = 0.02; llong = variable

Igual que nos ha pasado cuando estudiábamos el comportamiento del coeficiente de desagüe con geometría fija, los resultados obtenidos con caudal circulante son muy parecidos a los obtenidos con el cociente Q/y. Al variar la geometría de la sección, concretamente dejando como fija la pendiente transversal y variando la pendiente longitudinal, vemos que el coeficiente de desagüe disminuye a medida que aumenta el cociente Q/y con la característica particular que esta disminución queda ajustada de forma lineal y descendente para los valores de mismo calado. Esta correlación es fuerte ya que el R^2 da valores muy cercanos a 1, con la particularidad comentada anteriormente que estos ajustes lineales se muestran casi paralelos entre valores de calado iguales.

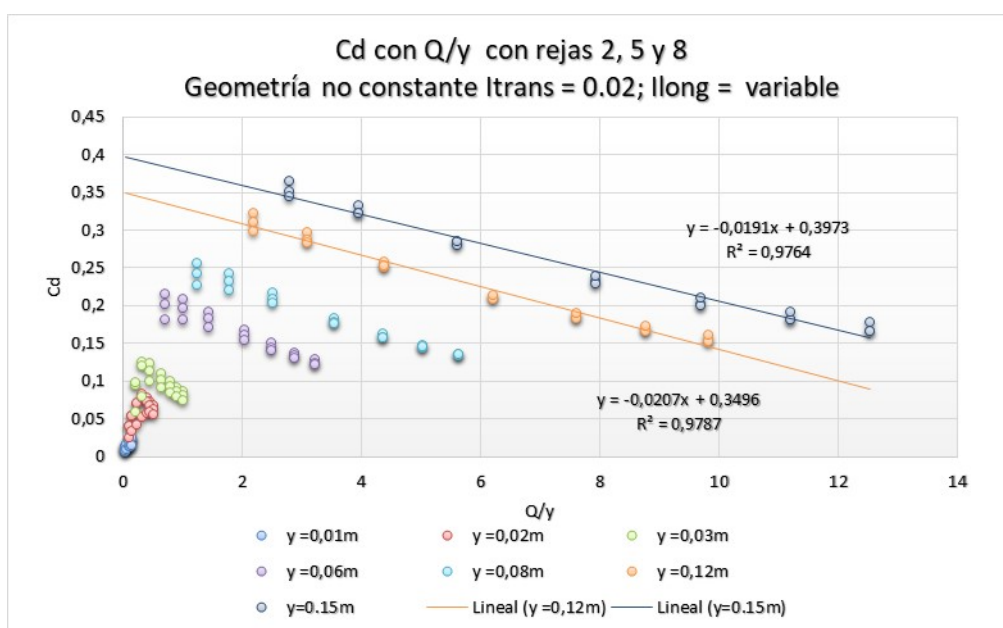


Gráfico 33: Cd con Q/y con rejas 2, 5 y 8 con ltrans = 0.02; llong = variable

Al graficar la misma situación con todos los tipos de reja vemos que la situación descrita anteriormente se sigue cumpliendo casi con exactitud.

8.2.5 Coeficiente de desagüe en función del caudal circulante con geometrías de calle variables modificando la pendiente transversal

Una vez analizado que pasa con el coeficiente de desagüe al mantener la geometría fija y al mantener el pendiente transversal fijo y variar el longitudinal, nos preguntamos cómo se modificaría el coeficiente de desagüe manteniendo la pendiente longitudinal fija y variando la pendiente transversal por los valores de 0, 2 y 4%, obteniendo este resultado para el caudal circulante:

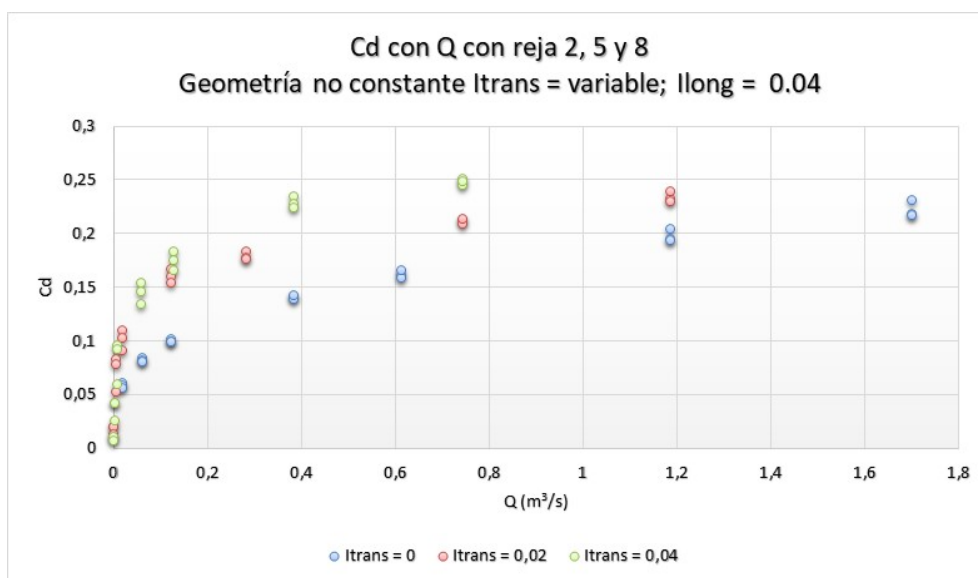


Gráfico 34: Cd con Q con rejas 2, 5 y 8 con l_{trans} = variable; $l_{long} = 0.04$

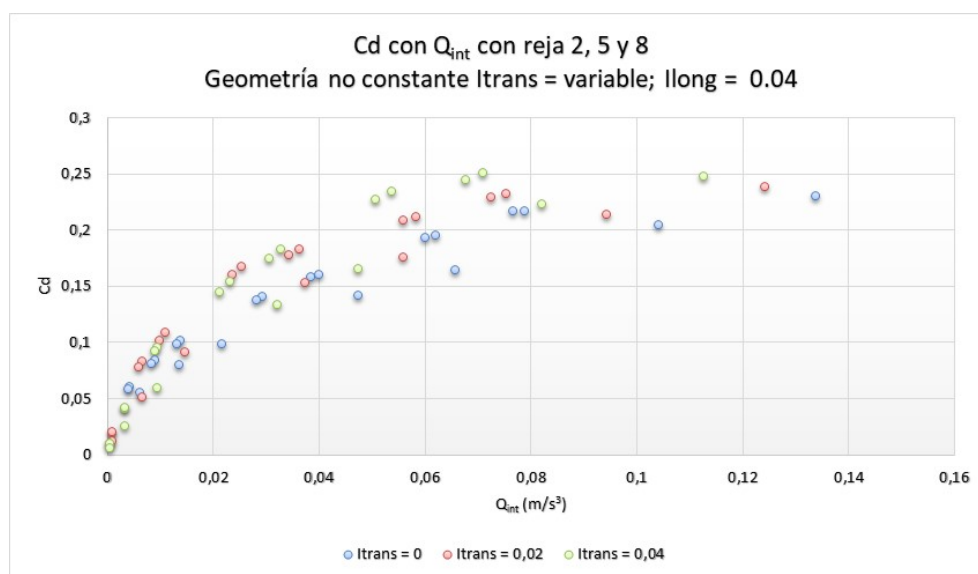


Gráfico 35: Cd con Q_{int} con rejas 2, 5 y 8 con l_{trans} = variable; $l_{long} = 0.04$

Como vemos en el gráfico, igual que pasaba cuando manteníamos la pendiente longitudinal variable y la transversal fija, para una geometría fija la relación entre el caudal circulante, el caudal intervenido y el cociente Q/y se ajustan de forma logarítmica con coeficiente de correlación elevados. De la misma forma que, a pendientes transversales más elevadas obtenemos coeficientes de desagüe más elevados y para pendientes transversales más bajas, obtenemos coeficientes de desagüe menos elevados. En estas situaciones vemos que no es conveniente un único ajuste logarítmico para todas las rejillas, ya que para las rejillas 2, 5 y 8 ya aparecen valores de coeficientes de desagüe muy distintos.

8.2.6 Coeficiente de desagüe en función del número de Froude con geometrías de calle variables modificando la pendiente longitudinal

Finalmente, vimos interesantes relacionar el coeficiente de Froude con el coeficiente de desagüe. Primero intentamos graficarlos manteniendo la pendiente transversal variable y la longitudinal fija, pero no obtuvimos ningún resultado ni correlación significativa. Sin embargo, al mantener la pendiente transversal fija y dejar la pendiente longitudinal variable obtuvimos estos resultados para la rejilla 2:

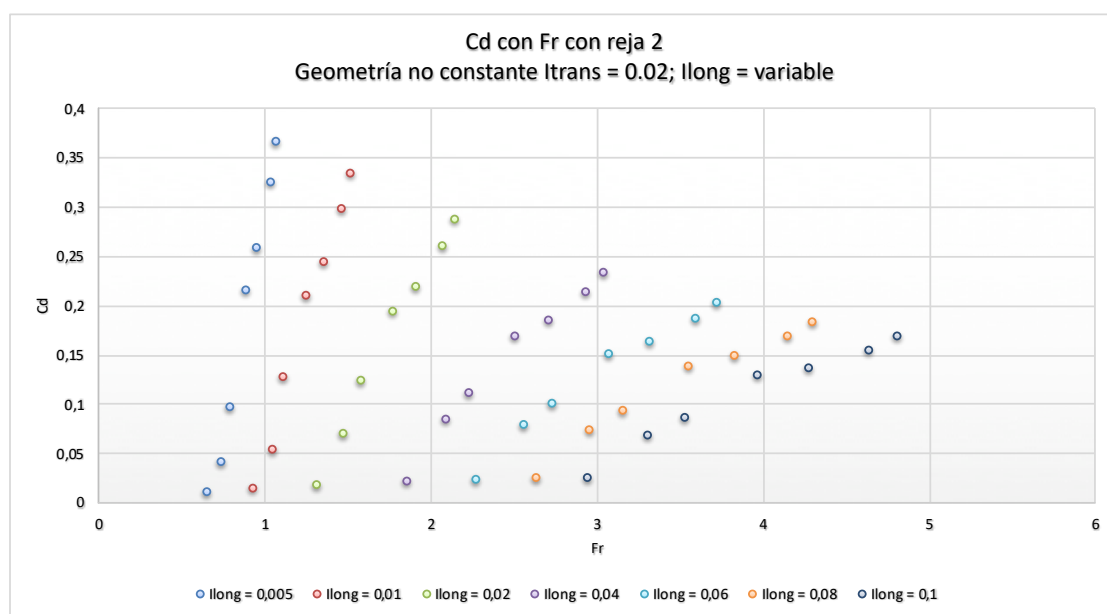


Gráfico 36: Cd con Fr con rejillas 2 con $I_{trans} = 0.02$; l_{long} = variable

Como vemos en el gráfico, donde decidimos primero agrupar los puntos por pendientes longitudinales, que en una misma pendiente longitudinal a medida que aumentamos el número de Froude el coeficiente de desagüe también lo hace. Lo hace de forma lineal ascendente, con coeficiente de correlación elevados. La pendiente de estos ajustes lineales aumenta al disminuir la pendiente longitudinal de la calle.

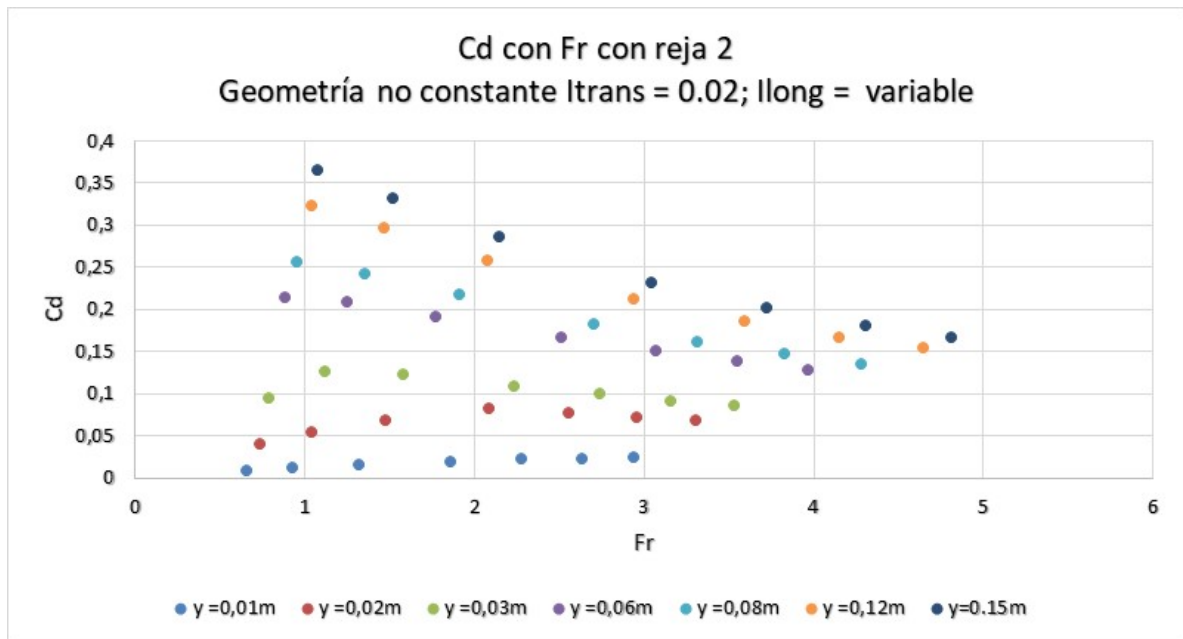


Gráfico 37: Cd con Fr con rejas 2 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = \text{variable}$

Decidimos también graficar la misma situación, pero esta vez agrupando los puntos según el calado del agua circulante. Haciendo el análisis de estos resultados vemos que para calados pequeños a medida que aumenta el coeficiente de Froude aumenta también el coeficiente de desagüe, sin embargo, para calados más elevados vemos que a medida que aumenta el coeficiente de Froude el coeficiente de desagüe disminuye. Ambas situaciones lo hacen con ajuste lineal con coeficiente de correlación R^2 elevado.

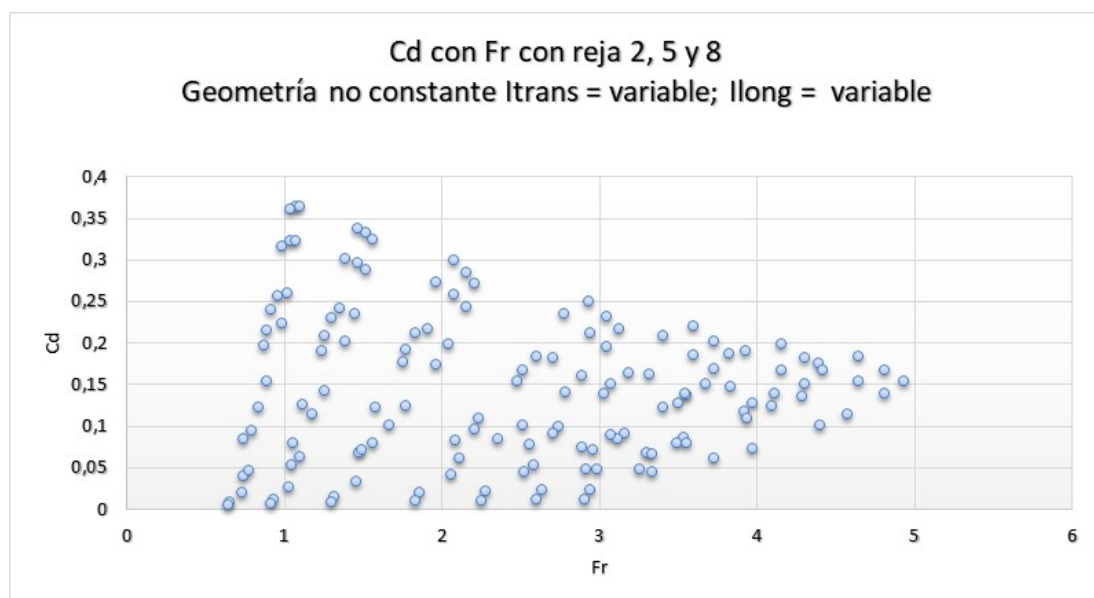


Gráfico 38: Cd con Fr con rejas 2, 5 y 8 con $l_{trans} = \text{variable}$; $l_{long} = \text{variable}$

Finalmente graficamos todas las situaciones con todas las rejillas y vimos que el comportamiento era muy parecido fuera cuál fuera la rejilla estudiada. Escogimos una geometría fija para evitar el exceso de puntos y poder analizar bien la situación y obtuvimos este resultado:

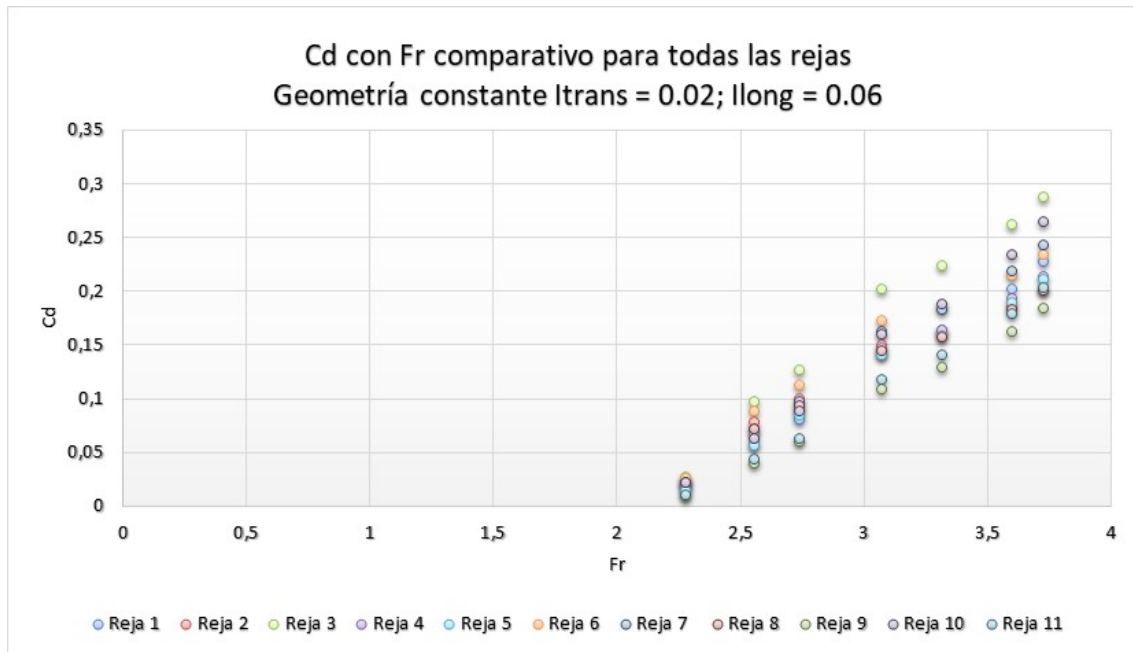


Gráfico 39: Cd con Fr de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

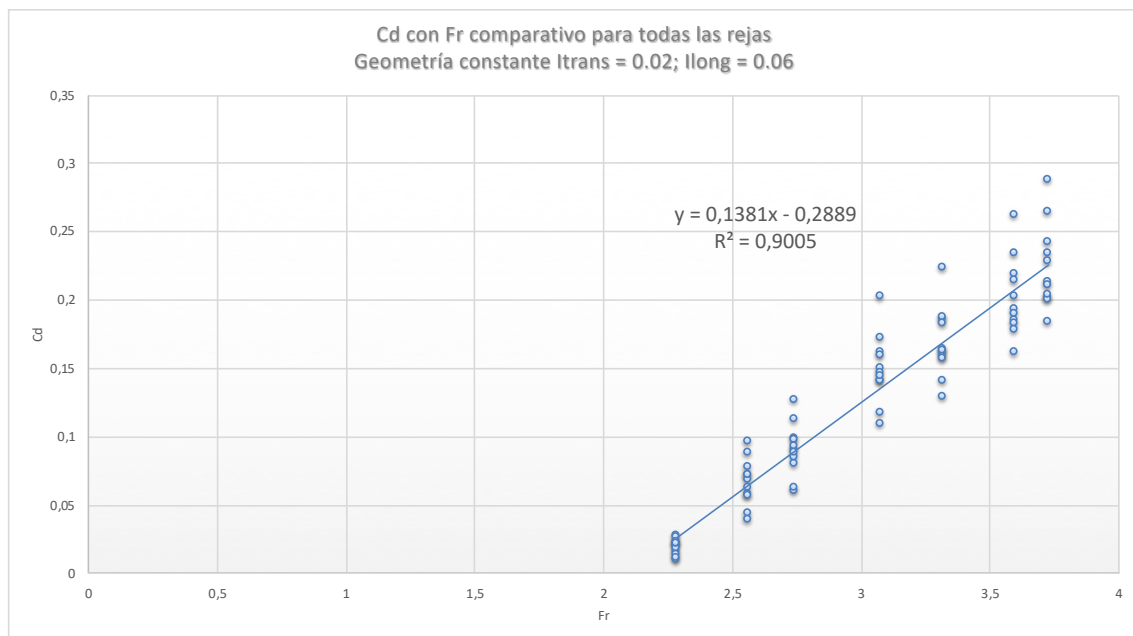


Gráfico 40: Cd con Fr de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

Al trazar estos dos gráficos vimos dos cosas muy interesantes. A medida que el número de Froude aumenta para una geometría fija, también lo hace el coeficiente de desagüe pero, además, la diferencia entre los coeficientes de desagüe entre rejillas distintas aumenta a medida que también lo hace el número de Froude. Por otro lado, igual que en los casos anteriores, trazar un único ajuste lineal de esta variación de coeficiente de desagüe con Froude para todas las rejillas no lo consideramos del todo correcto, prefiriendo dar un ajuste lineal para cada rejilla. De todos modos, si eliminásemos las rejillas que dan valores extremos, 3, 9 y 11, si que podríamos tener un único ajuste que nos diera información bastante fiable para el resto de rejillas tal y como se muestre en el siguiente gráfico:

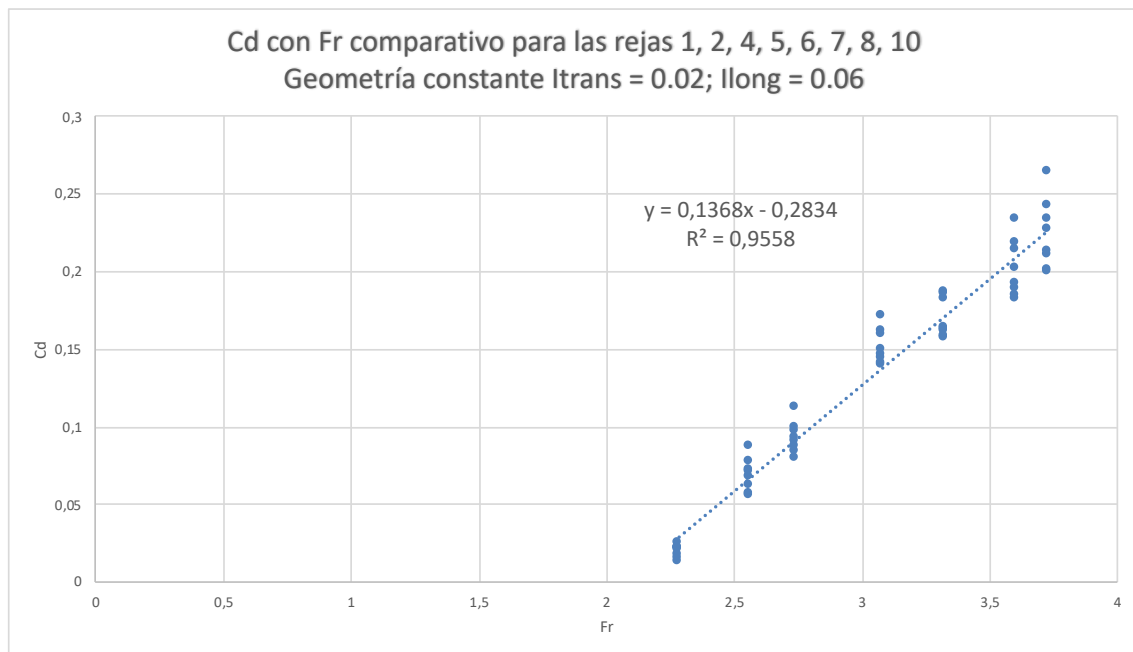


Gráfico 41: Cd con Fr de las rejillas 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

10. Conclusiones

- En geometrías de calle fijas, es decir, cuando la pendiente longitudinal y transversal se mantienen constantes, el coeficiente de desagüe aumenta a medida que lo hace el caudal de la calle, el caudal captado o la ratio Q/y . Este aumento del coeficiente de desagüe se ajusta logarítmicamente de modo $C_d = A \cdot \log(X) + B$ con coeficientes de correlación R^2 muy elevados para algún conjunto de rejillas, pero no para su totalidad. Los coeficientes A y B dependen tanto de la geometría de la calle como del tipo de rejilla que estamos estudiando.

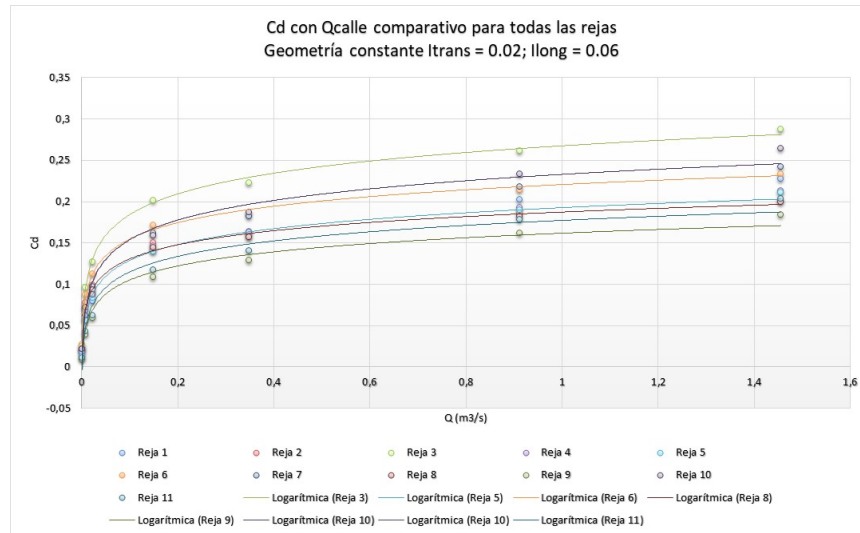
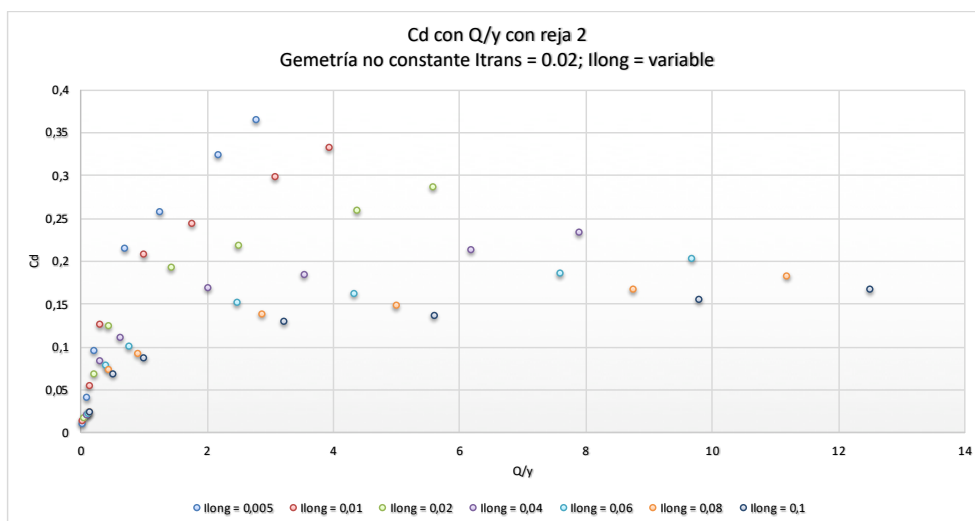


Gráfico 42: C_d con Q_{calle} de todas las rejillas con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = 0.06$

- Para la totalidad de las rejillas no podemos ajustar logarítmicamente el coeficiente de desagüe según parámetros A y B que dependan de la geometría de la calle ya que para valores medios y altos de calado nos encontramos diferencias de hasta el 30% de la realidad al ajuste.
- Para la totalidad de las rejillas vemos conveniente usar un ajuste lineal para cada una de las rejillas en una geometría concreta, así encontramos valores muy precisos del coeficiente de desagüe conociendo del caudal de la calle.
- Para geometrías de calle constante las rejillas 3 y 10 son las rejillas con coeficientes de desagüe más elevados y las rejillas 9 y 11 son las rejillas con menor coeficiente de desagüe.
- Los coeficientes de desagüe obtenidos son bastante más bajos que los valores sugeridos en ciertos manuales de usuario de programas de cálculo comerciales que sugieren emplear un coeficiente de desagüe constante de valor 0.6, sobrevalorando así la capacidad de captación de los sumideros e infravalorando la posible inundación.

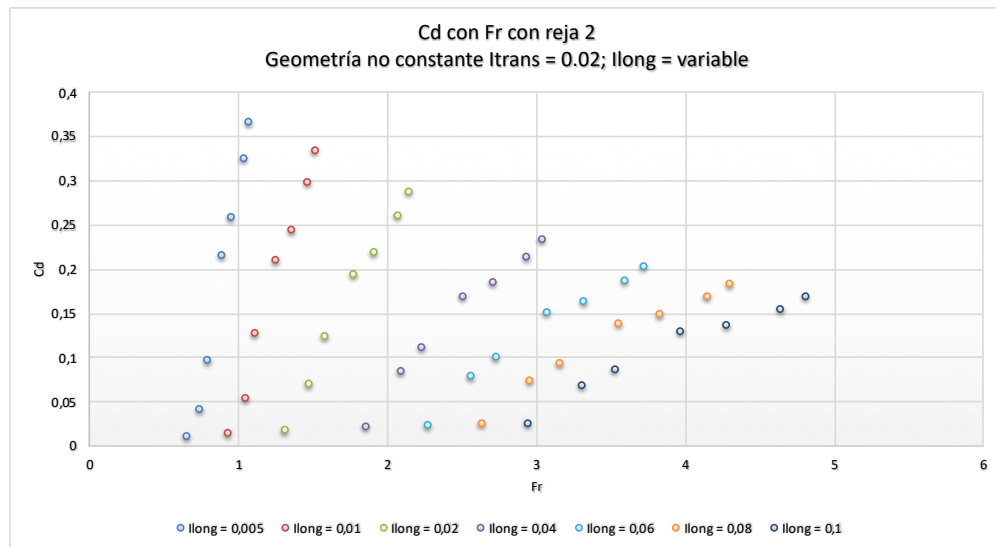
- Los valores de coeficiente de desagüe no son constantes y estos dependen del tipo de reja, la geometría de la calle y el caudal. El rango de valores del coeficiente de desagüe para nuestras situaciones descritas durante todo el trabajo es entre 0.002 a 0.479.
- Para valores de caudal bajos el coeficiente de desagüe aumenta rápidamente, pero a medida que el caudal crece el coeficiente de desagüe aumenta más lentamente. Esta realidad, con los ensayos realizados, nos permite pronosticar coeficientes de desagüe no muy superiores a 0.47 en rejas y geometrías muy concretas.
- Para pendientes transversales constantes una disminución de la pendiente longitudinal implica ajustes logarítmicos con pendientes más fuertes, donde se observan valores de coeficientes de desagüe más elevados con menos aumento de caudal. Es decir, para una pendiente baja se obtienen valores altos de coeficientes de desagüe con ratios Q/y i caudales de calle bajos y para una pendiente longitudinal alta para conseguir un valor un poco elevado de coeficiente de desagüe se deben tener ratios Q/y o caudales de calle muy elevados.



- En pendientes longitudinales bajas las diferencias de coeficientes de desagüe entre rejas son más elevadas que para pendientes longitudinales elevadas, donde las diferencias de coeficientes de desagüe entre todas las rejas son más bajas.
- Para pendientes longitudinales constantes una disminución de la pendiente transversal implica ajustes logarítmicos con pendientes más bajas. Para pendientes transversales pequeñas se requiere caudales o ratios Q/y elevados para alcanzar coeficientes de desagüe altos, sin embargo, para pendientes transversales elevadas los coeficientes de desagüe se elevan con ratios Q/y o caudales más bajos.
- En geometrías de calle variables donde se modifica la pendiente longitudinal y se mantiene fija la transversal, el coeficiente de desagüe se ve disminuido de forma lineal

para valores de calado aguas arriba de la reja iguales, independientemente cual sea la geometría. Se trata de un ajuste lineal del tipo $C_d = -A \cdot x + B$, donde los parámetros A y B dependen del tipo de reja y del valor del calado aguas arriba de la reja. A medida que aumenta el calado o la ratio Q/y para calados iguales aguas arriba de las rejas el coeficiente de desagüe disminuye linealmente.

- Para geometrías constantes a medida que el número de Froude aumenta, también lo hace el coeficiente de desagüe.



- Gráfico 44: C_d con Fr con rejas 2 con $l_{trans} = 0.02$; $l_{long} = variable$

- Para geometrías constantes los coeficientes de desagüe para rejas distintas son casi iguales para números de Froude bajos, al aumentar el número de Froude la diferencias entre coeficientes de desagüe para diferentes rejas aumenta considerablemente.
- Para pendientes longitudinales pequeñas y manteniendo la pendiente transversal fija un aumento pequeño del número de Froude implica un aumento rápido el coeficiente de desagüe de forma lineal con correlaciones elevadas. A medida que la pendiente longitudinal crece, para una misma pendiente longitudinal hace falta aumentar en mayor número de Froude para alcanzar valores de coeficientes de desagüe elevados.
- Para calados aguas arriba de la reja iguales, a medida que aumenta el número de Froude disminuye el coeficiente de desagüe de forma lineal con correlaciones elevadas para calados grandes. A medida que el calado disminuye la pendiente del ajuste lineal desciende, disminuyendo mas lentamente el coeficiente de desagüe con el avance del número de Froude. Para calados muy pequeños esta pendiente de ajuste lineal se vuelve positiva, aumentando el coeficiente de desagüe a medida que aumenta el número de Froude.

Bibliografia

- Gómez, M. et al. (2008, Curso de Hidrologia Urbana. Ed. Alfambra, Barcelona.
- Gómez, M y Russo, B. (2005), Metodología para el diseño de un nuevo sistema de captación en un tramo de la calle en Barcelona. XXI Congreso Latinoamericano Hidráulico Sao Pedro, Estado de Sao Paulo, Brasil.
- Gómez, M. et al. (2001), Definición de criterios de riesgo para el flujo de calles. Análisis del espaciamiento para rejillas e imbornales utilizados en la ciudad de Barcelona. Estudio realizado en la ETSECCPB a petición de CLABSA.
- Nanía, L.S. y Gómez, M. (2004), Ingeniería Hidrológica. Grupo Editorial Universitario. Granada.